

OFU Gimsøystraumen bru  
Instrumenteringsanbefaling

---

# Publikasjon nr. 88

## OFU Gimsøystraumen bru

### Anbefalinger for instrumentert korrosjonsovervåkning av kystbruer i betong

---

**Vegdirektoratet  
Veglaboratoriet**

Oslo, juni 1998

---

Veglaboratoriet

<p><b>Forfattere:</b></p> <p>Bård Espelid Geir Ivar Sletten Øystein Vennesland Erik Sellevold Ketil Videm Roar Myrdal Aage Blankvoll</p> <p><b>Firma:</b></p> <p>Det Norske Veritas Det Norske Veritas NTNU NTNU Universitetet i Oslo Rescon AS Statens vegvesen Nordland</p>	<p>OFU Gimsøystraumen bru:</p> <p><b>Anbefalinger for instrumentert korrosjonsovervåkning av kystbruer i betong</b></p> <p>Dato: juni 1998</p> <p>Antall sider: 68</p>
<p><b>Ekstrakt:</b></p> <p>Denne rapporten presenterer arbeidet som er utført av IDV-gruppen med hensyn på å utarbeide anbefalinger ved planlegging, prosjektering og installasjon av et overvåkningsanlegg for instrumentert korrosjonsovervåkning av kystbruer i betong.</p> <p>Rapporten gir også råd og anbefalinger knyttet til driftsfasen av et slikt overvåkningsanlegg.</p>	<p><b>Stikkord:</b></p> <p>Bru Betong Armeringskorrosjon Instrumentering Overvåkning</p>
<p><b>Extract:</b></p> <p>This report presents guidelines for instrumentation and monitoring of durability carried out by the Instrumentation, Documentation and Verification (IDV) Working Group of the Gimsøystraumen Bridge Repair Project. The guidelines are mainly based on experience from the project.</p> <p>The report gives a survey of different techniques for corrosion monitoring, gives recommendations concerning these techniques and proposes code of practice in use at new monitoring projects.</p>	<p><b>Keywords:</b></p> <p>Bridge Concrete Corrosion Instrumentation Monitoring</p>

Omslagsdesign: Svein Aarset, Oslo  
 Forsidebilde: S. Bøckmann, Bodø  
 Illustrasjoner: Det Norske Veritas, Bergen / SCC Abel Engh as, Drammen  
 Redaksjon/  
 produksjonskoordinator: Helge Holte, Veglaboratoriet  
 Trykk: Helli Grafisk as, Oslo

Opplag: 800

# Forord

Prosjektet «OFU Gimsøystraumen bru» var et samarbeid mellom Statens vegvesen, Rescon A/S og Statens Nærings- og Distriktsutviklingsfond (SND). Prosjektet knyttet forskning og utviklingsoppgaver til reparasjon av Gimsøystraumen bru i Nordland. Prosjektet startet i 1993 og ble avsluttet i 1997.

Det har i løpet av de siste 10 årene blitt fokusert på skader på våre kystbruer av betong. Behovet hos Statens vegvesen for nye vedlikeholds- og reparasjonsmetoder for betongbruer i kystklima var i korte trekk bakgrunnen for inngåelsen av OFU-kontrakten. I Statens vegvesen var det nært samarbeid mellom Nordland vegkontor, Bruavdelingen og Veglaboratoriet i Vegdirektoratet.

I prosjektets siste år (1996) besto basisorganisasjonen av en styringsgruppe og to prosjektgrupper. Prosjektgruppene hadde ansvaret for utarbeidelsen av sluttdokumentasjonen i prosjektet.

Styringsgruppen besto av Arnfinn Pettersen (Statens vegvesen Nordland), Geir Tjugum (Rescon AS), Håvard Østlid (Veglaboratoriet), Olav Grindland (Bruavdelingen), Elisabeth Schjølberg (Produksjonsavdelingen, Vegdirektoratet), Gørild Malm Cornejo (Veglaboratoriet) og Jan Henrik Sæther (SND). Prosjektleder var Aage Blankvoll, Statens vegvesen Nordland. Både prosjektleder og ansvarlig for gjennomføring av prosjektet hos Rescon, Bernt Kristiansen, møtte fast i styringsgruppen.

Reparasjonsgruppen besto av: Reidar Kompen (Veglaboratoriet), Aage Blankvoll (Statens vegvesen Nordland), Tor Berg (Statens vegvesen Nordland), Per Austnes (Statens vegvesen Møre og Romsdal), Einar Noremark (Statens vegvesen Hordaland), Knut Grefstad (Bruavdelingen), Bernt Kristiansen (Rescon AS), Bjørn Bonsak (Rescon AS) og Jon Halden (SCC Abel Engh AS).

IDV-gruppen hadde følgende medlemmer: Bård Espelid (Det Norske Veritas), Øystein Vennesland (NTNU), Erik J. Sellevold (NTNU), Ketil Videm (UiO), Bernt Kristiansen (Rescon AS), Roar Myrdal (Rescon AS), Claus K. Larsen (Veglaboratoriet), Finn Fluge (Veglaboratoriet), Aage Blankvoll (Statens vegvesen Nordland) og Tor Berg (Statens vegvesen Nordland).

Reparasjonsanbefalingen og Instrumenteringsanbefalingen er forutsatt å være et supplement til de håndbøker i Statens vegvesen som omhandler samme tema, dvs.

Håndbok 147: Forvaltning, drift og vedlikehold av bruer

Håndbok 136: Inspeksjonshåndbok for bruer

Håndbok 015: Feltundersøkelser

Håndbok 026: Prosesskode-2. Standard arbeidsbeskrivelse for bruer og kaier, 1997

Håndbok 129: Dokumentasjon av bruer.

Resultater fra prosjektet er også benyttet i utarbeidelsen av disse der dette har vært mulig i forhold til utgivelsestakten til håndbøkene.

Det vil bli en videre oppfølging av de utførte prøvereparasjonene på Gimsøystraumen bru i en 5-års periode med mulighet for forlengelse i 5 år til. Resultatene fra oppfølgingsprosjektet vil kunne medføre revisjoner av prosjektets «Reparasjonsanbefaling» og «Instrumenteringsanbefaling».

---

# Sammendrag

Denne publikasjonen presenterer arbeidet som er utført av IDV-gruppen med hensyn på å utarbeide anbefalinger ved planlegging, prosjektering og installasjon av et overvåkningsanlegg for instrumentert korrosjonsovervåkning av kystbruer i betong. Rapporten gir også råd og anbefalinger knyttet til driftsfasen av et slikt overvåkningsanlegg.

Instrumenteringsanbefalingen er utarbeidet med grunnlag av erfaringene gjort med instrumentert korrosjonsovervåkning på Gimsøystraumen bru. Anbefalingen gir en generell oversikt over ulike måleprinsipper som kan anvendes for å registrere tilstandsutvikling over tid og det settes opp generelle krav til overvåkningsanlegg.

I tillegg inneholder anbefalingen spesiell beskrivelse med tilhørende rådgivende tekst for hvordan instrumenteringen bør utføres i praksis og følges opp i drift for å sikre pålitelige måleverdier. Prosessene brukt for de spesielle beskrivelsestekstene bygger på prosesskoden.

Instrumenteringsanbefalingen inkluderer også veiledning ved installasjon av sensorer og overvåkningssystem basert på erfaringer i prosjektet. Dette må ikke oppfattes som absolute krav da andre prosedyrer enn de som er benyttet på Gimsøystraumen kan være relevante.

Viktige momenter under planlegging og prosjektering er at sluttbruker bør ha en sentral plass i planleggingen at det tas hensyn til på hvilken måte måleverdiene skal gjøres tilgjengelig. Det er viktig å foreta en grundig vurdering for å definere omfang og plassering av permanent installerte sensorer. Et annet moment er å vurdere antall målepunkt som skal instrumenteres for å unngå «overinstrumentering».

Prosjekteringen må ivareta samtlige elementer som inngår i overvåkningssystemet fra målesensor, via signalledninger og dataregistreringsenhet til dataoverføringssystem. I prosjekteringen må det spesifiseres at alle materialer, kabling og komponenter som skal benyttes tilfredsstillende bestandighet for det miljøet de blir eksponert. Utarbeidelse av driftsplan bør være en del av prosjekteringen. Det må i prosjekteringsfasen stilles krav til at det utarbeides As-built dokumentasjon.

Ved valg av sensorer som skal installeres, er det viktig å vurdere stabilitet som funksjon av eksponeringstid slik at vedlikeholdsprosedyrer, kalibreringsintervall og utskiftningskriterier kan etableres før anlegget settes i drift. Levetiden for hvert enkelt element av overvåkningssystemet må være tilpasset formålet. Sensorer skal leveres med kalibreringssertifikater og datablader med angivelse av spesifikasjoner, nøyaktighet og kalibreringsintervaller. De sensortypene som kan anbefales til bruk til korrosjonsovervåkning er beskrevet i de påfølgende avsnitt.

**Potensialmålinger med innstøpte referanseelektroder**

Potensialmålinger med innstøpte referanseelektroder har vært brukt i stort omfang på Gimsøystraumen bru. Erfaringene er mest omfattende med ERE 10/ERE 20 referanseelektroder, og disse har gitt og gir pålitelige måleverdier i eksponeringsperioden hittil. Innstøping av referanseelektroder anbefales som en sentral del i et automatisert tilstandsovervåkningssystem. Det anbefales at det installeres 2 referanseelektroder i hvert målepunkt som skal følges opp.

**Oksygentransportmåling (potensiostatisk polarisering)**

Metoden har vært anvendt på bred basis på Gimsøystraumen bru gjennom måling av oksygentransport i ulike områder og miljøsoner. Erfaringen med målemetoden fra prosjektet er god, da den effektivt synes å avspeile forskjeller i miljøbelastning samt effekter av forskjellige vedlikeholds- og reparasjonstiltak. Måling av oksygentransport anbefales inkludert i et automatisert tilstandsovervåkningssystem.

**Måling av korrosjonshastighet med elektriske motstandssonder**

Elektriske motstandssonder er ikke benyttet i instrumenteringen på Gimsøystraumen bru. Ut fra en vurdering av metoden, kan elektriske motstandssonder anbefales brukt, men behovet må vurderes nøye. Der metoden er mest velegnet (i nye konstruksjoner), er også oppfølgingsbehovet normalt lavest. En mulighet kan være å installere motstandssonder i byggefasen uten at sonden blir koblet opp til et automatisert tilstands- overvåkningssystem ved dag null.

**Elektrisk motstand**

Måling av elektrisk motstand i betongen anbefales inkludert i et automatisert tilstands- overvåkningssystem. På bakgrunn av erfaringene fra Gimsøystraumen bru anbefales bruk av Wenner-prinsippet for registrering av elektrisk motstand i betongen. I gjennomføring av målingene anbefales å bruke vekselspanning på 1000 Hz.

**Temperaturmåling**

Måling av temperatur i betongen bør inkluderes i et automatisert tilstandsovervåkings- system. På Gimsøystraumen bru er det benyttet temperatursensorer av typen kobber- konstantan termoelement. Erfaringen tilsier at termoelementtrådene må loddet og elementet kalibreres før innstøping. Temperatursensorene bør installeres i egne borehull og ikke i samme borehull som andre sensorer.

**Referansesensorer**

Det anbefales å legge inn konstante referansekanaler. Hensikten med referanse- sensorene er å kontrollere påliteligheten av loggesystemet kontinuerlig, og få en indika- sjon på hvor eventuelle feil ligger. Referanser må velges med konstante verdier som ligger innenfor måleområdet.

### **Valg av overvåkningssystem**

Det anbefales å benytte et overvåkningssystem som benytter lokale måleenheter. Det vil si at analoge signaler blir avlest så nær sensorene som mulig og at signalet blir omformet til et digitalt signal for overføring til lagringsenhet eller PC. Ved at måleresultatet overføres digitalt til PCen blir det dermed ikke påvirket av støy fra lange måleledninger. Alle data som samles inn blir permanent lagret i datalageret og kan overføres til brukerens PC ved hjelp av et modem.

### **Installasjon og driftsfase**

For installasjon og driftsfase er følgende 3 faktorer avgjørende:

- kontroll av samtlige sensorer etter installasjon
- drift i henhold til en på forhånd utarbeidet driftsplan
- planmessig verifikasjon av måledata.

# Summary

## Introduction

The objectives of the OFU-Gimsøystraumen Bridge Repair Project were:

- Increase competence in maintenance and repair of concrete bridges
- Obtain new knowledge and understanding of factors governing the durability of bridges in a harsh marine environment
- Further development of existing products and development of new products for maintenance and repair of concrete bridges
- Produce guidelines for maintenance and repair of concrete bridges
- Carry out maintenance and repair of Gimsøystraumen bridge in a technically and economically optimal way
- Classify the companies Rescon and Resconsult in accordance with the ISO-9000 series
- Increase the competitive power of Rescon in the home market and increase the export of their products and services.

The project started in 1993 for an initial period of four years. The research has brought forward many interesting and important results. The need for a follow-up period of 10 years has been highlighted.

The three main parties involved in the project were the Norwegian Public Roads Administration (NPRA), the Norwegian Industrial and Regional Development Fund (SND) and Rescon AS. Rescon is the only wholly Norwegian owned company which develops and produces products for maintenance and repair of concrete structures.

Many of the results from the project were presented at an international conference in May 1997 to mark the end of the project. The papers were published in the Proceedings from this conference /14/ and in the Additional papers to the proceedings /15/.

This report presents guidelines for instrumentation and monitoring of durability carried out by the Instrumentation, Documentation and Verification (IDV) Working Group of the Gimsøystraumen Bridge Repair Project. The guidelines are mainly based on experiences from the project.

The report gives a survey of different techniques for corrosion monitoring as well as recommendations concerning these techniques, and proposes code of practice for use in new monitoring projects.



A computerised monitoring system must meet specifically defined objectives such as to monitor continuously the durability of the structure, to monitor the condition in order to make timely decisions for preventive and/or repair actions, to monitor the effect of preventive actions, to monitor the condition of specific and/or advanced structures, e.g. based on new technology, or to follow the condition development in areas where access is difficult or complex.

The selection or definition of sensors should take into account an evaluation of sensor stability as function of lifetime so that necessary maintenance, calibrations and replacements can be planned prior to installation of the system. Both the technical and the economical requirements needed to run the system should be made clear.

Based on the experiences at Gimsøystraumen Bridge the following measurement techniques can be recommended for monitoring of durability:

#### **Potential measurements**

The potential measurements on Gimsøystraumen Bridge show very small long-term variations, reflecting that possible effects of surface treatments or initiation of corrosion in untreated areas are slow processes. Embedded reference electrodes are considered vital sensors when monitoring and are consequently recommended as part of a computerised system.

#### **Potensiostatic polarisation**

The cathodic capacity of embedded steel, which can be recorded by this method, is relevant information when evaluating the possibility of corrosion locally, the possibility of «macro-cell» corrosion and the influence of environmental parameters on the corrosion process. This method has been applied extensively on Gimsøystraumen Bridge, primarily to record the oxygen transport in different structural elements and in zones of different environmental loading. The experiences with the method from Gimsøystraumen Bridge are good, as results reflect differences in environmental loads on the structure as well as effects of different maintenance actions, e.g. coating of the concrete surface. Potensiostatic polarisation is recommended as part of a computerised monitoring programme.

#### **Resistance probe**

The resistance probe works by measuring the resistance of a steel specimen. As it corrodes away, the resistance goes up. The resistance probe is not used at Gimsøystraumen Bridge, but based on an evaluation of the method it is recommended as part of a computerised monitoring programme. Especially, it is recommended for durability monitoring of new concrete structures (the probes can be embedded in the construction concrete).

**Concrete resistivity probe**

The experience from the Gimsøystraumen project is that resistance measurements carried out according to the Wenner-principle seem to map the temperature and humidity influence accurately. This type of measurement is therefore recommended as part of a computerised monitoring system. However, it should be noted that when embedded into «old» structures, it might take months before the effect of water supply from the installation mortar is negligible.

**Temperature measurements**

All chemical and physical processes in concrete are temperature dependent. Temperature recordings will therefore be of importance for interpretation of data recorded from other sensors. Temperature measurements in concrete are simple and relatively cheap. Provided relevant quality control is exercised during installation of thermo couples and/or resistance elements, the experience from the Gimsøystraumen project is that reliable long-term measurements can be obtained. Temperature measurements should be included in a computerised monitoring programme.

**Reference sensors**

Reference signals (e.g. voltage, temperature, resistance) should be included in the monitoring system as a check of the readings made by the data acquisition system.

**Data acquisition and processing**

The installation of probes and sensors in the structure is only one important task in establishing a computerised monitoring system. Another important task is to specify, install and use a data acquisition system where the main objective should be to produce data valuable for the end-user. Analogue data transfer is not recommended. Analogue signals should be converted to digital signals near the sensors. The reason is that transfer of digital signalising is less sensitive to electrical and electromagnetic noise.

**Operation and data handling**

During operation, three requirements must be fulfilled:

- checking all the sensors and the system after installation
- operation of the monitoring system must be based on a manual for service and maintenance
- repeated verification that instrumentation and measurements are working as expected must be performed.

# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Definisjoner og forkortelser .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Bruk av instrumentert korrosjonsovervåkning .....</b>	<b>6</b>
3.1	Bakgrunn.....	6
3.2	Målsetninger .....	7
3.3	Overordnede krav ved planlegging og prosjektering.....	8
3.4	Overordnede krav ved installasjon og drift.....	10
3.4.1	Installasjon .....	10
3.4.2	Drift.....	12
3.4.3	Presentasjon av måledata .....	13
3.4.4	Verifikasjon, kontroll og kvalitetssikring.....	14
<b>4</b>	<b>Måleprinsipper for korrosjonsovervåkning .....</b>	<b>15</b>
4.1	Generelt om korrosjonsovervåkning .....	15
4.2	Elektrokjemiske målinger .....	15
4.2.1	Potensialmåling .....	15
4.2.2	Elektrokjemisk støy.....	18
4.2.3	Lineærpolarisering.....	19
4.2.4	AC-impedans.....	20
4.2.5	Oksygentransportmåling (potensiostatisk polarisering) .....	21
4.2.6	Elektriske motstandssonder.....	23
4.3	Betongrelaterte parametre .....	24
4.3.1	Elektrisk motstand .....	24
4.3.2	Fuktmålinger.....	28
4.3.3	Temperaturmåling .....	29
<b>5</b>	<b>Styre- og overvåkningsanlegg.....</b>	<b>31</b>
5.1	Oppbygning av og oversikt over spesiell beskrivelse.....	31
5.2	Beskrivelse av system for korrosjonsovervåkning .....	32
5.2.1	Spesiell beskrivelse - Anlegg for korrosjonsovervåkning.....	32
5.2.2	Kommentarer til spesiell beskrivelse.....	37
5.3	Referanseelektroder for potensialmålinger .....	36
5.3.1	Spesiell beskrivelse - Referanseelektroder for potensialmåling .....	36
5.3.2	Kommentarer til spesiell beskrivelse.....	37
5.3.3	Veiledning ved installering av referanseelektroder.....	37
5.4	Måling av oksygentransport i betong.....	39
5.4.1	Spesiell beskrivelse - Instrumentering for måling av oksygentransport ..	39
5.4.2	Kommentarer til spesiell beskrivelse.....	40
5.5	Måling av korrosjonshastighet med elektriske motstandssonder .....	41
5.5.1	Spesiell beskrivelse - Elektriske motstandssonder.....	41
5.5.2	Kommentarer til spesiell beskrivelse.....	41
5.6	Måling av elektrisk motstand i betong.....	43
5.6.1	Spesiell beskrivelse - Instrumentering for måling av elektrisk motstand ...	43
5.6.2	Kommentarer til spesiell beskrivelse.....	44

---

5.7	Installasjon av sonder for måling av relativ fuktighet.....	45
5.7.1	<i>Spesiell beskrivelse - Installasjon av RF-sonder</i> .....	45
5.7.2	<i>Kommentarer til spesiell beskrivelse</i> .....	45
5.7.3	<i>Veiledning ved installasjon</i> .....	46
5.8	Måling av temperatur i betongen .....	47
5.8.1	<i>Spesiell beskrivelse - Temperatursensorer</i> .....	47
5.8.2	<i>Kommentar til spesiell beskrivelse</i> .....	47
5.8.3	<i>Veiledning ved installering av temperatursensorer</i> .....	47
5.9	Referansesensorer og jordingspunkter.....	49
5.9.1	<i>Spesiell beskrivelse - Referansesensorer</i> .....	49
5.9.2	<i>Spesiell beskrivelse - Jordingspunkter</i> .....	49
<b>6</b>	<b>Oppsummering og anbefalinger</b> .....	<b>50</b>
6.1	Planlegging og prosjektering .....	50
6.2	Sensortyper.....	50
6.3	Automatisk overvåkningssystem .....	53
6.4	Installasjon og driftsfase.....	53
6.5	Bruk av måledata .....	54
<b>7</b>	<b>Referanser</b> .....	<b>55</b>

# 1 Innledning

Betongkonstruksjoner i kystklima vil utsettes for miljømessige belastninger som kan føre til skader som forkorter levetiden for brumassen. For å optimalisere forvaltningen av og sikre påliteligheten til betongkonstruksjoner i aggressive miljø, er det derfor viktig å ha et informasjonsgrunnlag om tilstandsutviklingen til konstruksjonene i løpet av levetiden. Et slikt informasjonsgrunnlag kan etableres gjennom regelmessige tilstandskontroller av bruene ved hjelp av ulike inspeksjonsteknikker og tilstandsovervåkning med av fast installerte sensorer og kontinuerlig lagring av registrerte måleverdier.

I Statens vegvesen skal bruforvaltningen gjennomføres i tråd med retningslinjene i håndbok 147 Forvaltning, drift og vedlikehold av bruer /1/. I henhold til håndbok 147 skal bruvedlikeholdsansvarlig på vegkontorene vurdere nødvendig instrumentering for å overvåke tilstanden til bruer i driftsfasen. Rutinemessige inspeksjoner skal gjennomføres etter håndbok 136 Inspeksjonshåndbok for bruer /2/.

Et omfattende system for automatisert korrosjonsovervåkning ble installert på Gimsøystraumen bru for å registrere mulige effekter av prøvereparasjonene som ble utført i prosjektet «OFU Gimsøystraumen bru». I tillegg til nytteverdien av alle måleverdiene som er samlet inn har en gjennom prosjektet vunnet betydelig erfaring med instrumenteringstekniske aspekter som kan ha stor innvirkning på påliteligheten av innsamlede måleverdier.

Instrumenteringsanbefalingen er utarbeidet med grunnlag av erfaringene gjort med instrumentert korrosjonsovervåkning på Gimsøystraumen bru /3/. Instrumenteringsanbefalingen er ment å være hjelpemiddel ved prosjektering, installasjon og drift av slike anlegg. Anbefalingen gir en generell oversikt over ulike måleprinsipp som kan anvendes for å registrere tilstandsutvikling over tid og det settes opp generelle krav til overvåkningsanlegg.

I tillegg inneholder anbefalingen spesiell beskrivelse med tilhørende rådgivende tekst for hvordan instrumenteringen bør utføres i praksis og følges opp i drift for å sikre pålitelige måleverdier. Prosessene brukt for de spesielle beskrivelsestekstene bygger på prosesskoden /8/.

Instrumenteringsanbefalingen inkluderer også veiledning ved installasjon av sensorer og overvåkningssystem basert på erfaringer i prosjektet. Dette må ikke oppfattes som absolutte krav da andre prosedyrer enn de som er brukt på Gimsøystraumen kan være relevante.

Anbefalingen omfatter ikke instrumentert overvåkning av betongkonstruksjoners last-respons.

I delprosjekt 4 av FoU-prosjektet «BESTANDIGE BETONGKONSTRUKSJONER» som ble gjennomført i perioden 1996-1998 var det en målsetting å bruke Instrumenteringsanbefalingen fra prosjektet OFU Gimsøystraumen bru som grunnlag for utarbeidelse av tilbuds-/anbudsgrunnlag for instrumentering av to andre bruer. Arbeidet med ferdigstillingen av denne rapporten og sluttrapporten /9/ fra delprosjekt 4 gikk delvis parallelt og ble i stor grad utført av de samme personene. Det er av den grunn en viss overlapping mellom disse rapportene.

## 2 Definisjoner og forkortelser

Elektrode:

- Et metall i en elektrolytt hvor en elektrokjemisk reaksjon foregår.

Anode:

- En elektrode hvor det foregår en oksidasjonsprosess (elektrokjemisk reaksjon med tap av elektroner, i dagligtale kalt korrosjon) der metall nedbrytes.

Katode:

- En elektrode hvor det foregår en reduksjonsprosess (elektroden tilføres elektroner slik at korrosjon motvirkes).

Elektrodepotensial:

- Potensialet til en elektrode målt mot en referanseelektrode med kjent egenpotensial.

Elektrokjemisk reaksjon:

- En kjemisk reaksjon kjennetegnet ved tap eller tilførsel av elektroner på overflaten til en elektrode.

Elektrokjemisk celle:

- En celle som består av to elektroder neddykket i en elektrolytt.

Elektrolytt:

- En løsning hvor strøm transporteres av ioner.

Ion:

- Et elektrisk ladet atom eller molekyl.

Passivitet:

- En tilstand hvor et metall er dekket av et oksid (eller en annen forbindelse) og korrosjonshastigheten blir som følge av dette neglisjerbar.

Korrosjon:

- Nedbrytning av et metall gjennom en kjemisk eller elektrokjemisk reaksjon med omgivelsene.

**Korrosjonshastighet:**

- Hastigheten som korrosjonsangrepet forløper med, vanligvis uttrykt i strøm per flateenhet (for eksempel  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  eller  $\text{mA}/\text{m}^2$ ) eller som angrepsdybde per tidsenhet (for eksempel mm/år).

**Strømtetthet:**

- Strøm per flateenhet til en elektrode, for eksempel uttrykt i  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  eller  $\text{mA}/\text{m}^2$ .

**Aktivt metall:**

- Metall med stor forutsetning til å reagere (korrodere).

**Ledende belegg:**

- Metallisk belegg eller maling, mastic osv. som er tilsatt et høyt innhold av en elektrisk ledende komponent.

**Strøm:**

- Et mål på elektrisiteten som transporteres i en leder eller en elektrokjemisk celle. Strømmen kan variere i styrke, gå en vei (likestrøm) eller vekselvis gå «frem og tilbake» (vekselstrøm).

**IR-fall:**

- Produktet av motstanden i en elektrolytt og den strømmen som transporteres gjennom elektrolytten. I betong vil dette generere et spenningsfall mellom innstøpt stål og en referanseelektroden. Spenningsfallet vil avhenge av referanseelektrodens plassering i forhold til ståloverflaten det måles potensial på, størrelse på strømmen som transporteres og den elektriske motstand i betongen.

**Referanseelektrode:**

- En elektrode (halvcelle) som kombinert med en spesifikk elektrolytt er i stand til å generere et reproducerbart og stabilt potensial. Anvendt på et metall/elektrolytt system vil en referanseelektrode bidra til å angi metallets potensial.

**Likestrøm:**

- Strømmen beveger seg i en retning. Strømmengden kan beregnes med Ohms lov:  $I = U / R$ . Her er  $U$  er den «drivende elektriske spenning» og  $R$  ohmsk motstand.

**Ohmsk motstand:**

- Et objekts evne til å forhindre eller motarbeide («bremse») en elektrisk strøm. Størrelsen på motstanden i en elektrisk krets bestemmer mengden av strøm som kan transporteres gjennom kretsen for en gitt elektrisk spenning i henhold til Ohms lov  $R = U / I$ .



#### Ledningsevne:

- Et mål på et materials evne til å lede elektrisitet. Ledningsevne er det omvendte av ohmsk motstand ( $1/R$ ).

#### Resistivitet:

- Et materiales motstand mot likestrøm målt mellom to parallelle flater av materialet som har en enhets lengde og enhets tverrsnitt. Spesifikk motstand kan beregnes ved: *Resistivitet*,  $\rho = R \cdot L/A$ .

#### Vekselstrøm:

- Strømretningen varierer. Ohms lov kan ikke anvendes direkte når vekselstrømkretser inneholder impedans eller kapasitans (spoler og batterier). Ohms lov for vekselstrømkretser uttrykkes:  $U=I \times Z$ , der  $Z$  er impedansen.

#### Impedans:

- I vekselstrømkretser betegnes motstanden med impedansen,  $Z$ , som kan bestå av kapasitans, induktans eller ren elektrisk motstand. Den totale impedansen må beregnes vha. vektorer eller algebraiske ligninger.

#### Kapasitans:

- Evnen til et system av ledere og halvledere til å lagre elektrisitet når det foreligger en potensialforskjell mellom lederne. Størrelsen på en kapasitans uttrykkes som forholdet mellom mengden av elektrisitet lagret og potensialforskjellen (Farad).

#### Induktans:

- Induktansen til en elektrisk krets karakteriserer størrelsen på motspenningen som genereres når strømtransporten i kretsen endres med en gitt hastighet.

#### Motstandsmålinger mellom to bolter:

- Utføres ved å påføre en konstant vekselspanning mellom to bolter og registrere den resulterende strøm.

#### Wenner-prinsippet:

- 4 bolter monteres i definert avstand langs en linje på betongoverflaten. En spenning påføres de to ytterste boltene, og den resulterende strømmen som da går mellom disse boltene registreres. Spenningsfallet over de midterste boltene registreres samtidig, og motstanden beregnes som forholdet mellom spenningsfallet over de midterste boltene og strømmen mellom de ytterste boltene.

## 3 Bruk av instrumentert korrosjonsovervåkning

### 3.1 Bakgrunn

For å ivareta sikkerhet og optimal forvaltning av brumassen, er det viktig å ha oversikt over bruens tilstand. Dette tilstrebes oppnådd gjennom rutinemessige inspeksjoner i henhold til retningslinjene i håndbok 147 Forvaltning, drift og vedlikehold av bruar /1/. Inspeksjonsrapporter skal registreres i FDV-programmet BRUTUS. Ved gjentatte inspeksjoner vil tilstandsutviklingen fremkomme ved å se hvordan tilstanden endres fra inspeksjon til inspeksjon. Bruk av instrumentert tilstandsovervåkning i tillegg til de rutinemessige inspeksjonene gjør det mulig å følge utviklingen kontinuerlig over lang tid. Dette muliggjør å få langtidstrender for tilstandsutviklingen og varsel før visuelt synlige skader oppstår.

Instrumentering vil ikke kunne fange opp alle typer nedbrytning av konstruksjonen eller skader på grunn av plutselige hendelser. Dessuten må instrumentering, dvs. installasjon av sensorer, nødvendigvis bli gjort på en begrenset del av konstruksjonen. En vellykket instrumentering vil kunne bidra til økt innsikt i tilstandsutviklingen, men vil ikke kunne erstatte rutinemessige inspeksjoner. Bruk av installerte sensorer kan bidra til innsyn i tilstandsutviklingen, mens rutinemessige inspeksjoner vil ivareta oversikten i tilstandsutviklingen og er helt nødvendig for å ivareta sikkerheten. Instrumentert tilstandsovervåkning kan bidra til utvidet totalinformasjon om konstruksjonens tilstand og være et viktig hjelpemiddel i driftsfasen. Det er viktig å understreke at instrumentert overvåkning må være en integrert del av konstruksjonens FDV-system.

Instrumentert tilstandsovervåkning kan implementeres i byggefasen eller i en eksisterende konstruksjon. Ved implementering i byggefasen er det mulig å følge tilstandsutviklingen helt fra starten. Selve installasjonen av sensorer er ofte lettere i byggefasen da det unngås å bruke innstøpningsmørtler med andre egenskaper enn betongens. Problemet med installasjon i byggefasen er at levetiden til sensorer og tilhørende utstyr ikke er dokumentert å overstige 10-20 år, mens prosjektert levetid for nye konstruksjoner blir målsatt til 50-100 år.

Graden av automatisert registrering av måledata ved instrumentering kan være forskjellig. Den enkleste varianten er å støpe inn sensorer og foreta avlesning med manuelle måleinstrumenter. Dette gir imidlertid ikke kontinuerlige målinger. Neste steg er å koble alle sensorer til datalogger som tappes manuelt for data med jevne mellomrom. Siste steg er å overføre data vha. telemodem til PC for fullstendig automatisert

overvåkning. En mulighet med nye konstruksjoner er å foreta innstøping av sensorer i byggefasen og vente med å foreta tilknytning til datalogger til et tidspunkt da konstruksjonen har et sterkere behov for oppfølging.

I dette dokumentet vil forhold knyttet til automatisert tilstandsovervåkning bli omtalt. Med automatisert tilstandsovervåkning menes at en ved hjelp av automatisert datafangst fra fast installerte sensorer i konstruksjoner kan få enkeltsignaler eller en kombinasjon av signaler som kan karakterisere tilstand eller mulige nedbrytningsmekanismer.

Utvikling av en strategi for automatisert tilstandsovervåkning vil kreve tverrfaglig kompetanse. I en slik prosess vil det være nødvendig å ha kunnskap om:

- klima- og miljøbelastninger
- forventede nedbrytningsmekanismer
- forventet strukturrepons på ytre påkjenning (klima og miljø)
- byggeprosessen
- kritiske områder på konstruksjonen
- sensorteknologi
- dataoverføring, automatisert datainnsamling og dataanalyse
- betongteknologi
- elektrokjemi.

Instrumenteringsanbefalingen skal således være et bidrag til at tverrfaglige aspekter som er viktige ved planlegging og bruk av et automatisert tilstandsovervåkningssystem blir ivarettatt slik at innsamlede data fyller forutsatte forventninger og funksjonskrav.

## 3.2 Målsetninger

Målsetningene med installasjon av et automatisert tilstandsovervåkningssystem kan være flere:

- kontinuerlig overvåkning av tilstandsutviklingen til konstruksjonen og derved bidra til sikker og pålitelig drift
- overvåkning av tilstand for beslutning om iverksettelse av vedlikehold og/eller reparasjon
- oppfølging av effekten av vedlikeholdstiltak eller reparasjoner for å optimalisere videre drifts- og vedlikeholdskostnader eller for å verifisere om tiltaket fungerer som forutsatt
- oppfølging av nye, spesielle og/eller avanserte konstruksjoner med formål å verifisere prosjekteringsgrunnlaget
- oppfølging av vanskelig tilgjengelige områder

- kontinuerlig oppfølging av karakteristiske områder som er representative for et større antall konstruksjoner for å optimalisere vedlikeholdskostnader eller verifisere prosjekteringsgrunnlaget
- redusere inspeksjonskostnadene for konstruksjonen gjennom levetiden pga. mindre behov for materialundersøkelser og bruk av spesielle målemetoder i felt
- registrere effekter i spesielt aggressive miljø for å få tidlig forvarsel før skader oppstår eller for å verifisere prosjekteringsgrunnlaget.

Det må understrekes at et automatisert tilstandsovervåkningssystem ikke vil erstatte rutine-messige inspeksjoner, men være et supplement.

### **3.3 Overordnede krav ved planlegging og prosjektering**

For å møte en eller flere av målsettingene gitt i forrige kapittel, er det viktig at planlegging og prosjektering av et automatisert tilstandsovervåkningssystem ivaretar følgende aspekter:

- Sluttbruker (helst eier av konstruksjonen) må ha en sentral plass i planleggingen av et anlegg for instrumentert tilstandsovervåkning. Systemet skal brukes i konstruksjonens driftsfase og det sluttbruker som skal nyttiggjøre seg de innsamlede tilstandsdata.
- basert på tverrfaglig kompetanse er det allerede i prosjekteringsfasen viktig å definere omfang og plassering av permanent installerte sensorer utfra kriterier som periodisk tilstandskontroll, konstruksjonsgeometri, strukturelle belastninger, materialvalg, klima- og miljøbelastninger, tidligere brukserfaringer, planlagt vedlikeholdsnivå, reparasjonsvennlighet osv.
- Det er viktig å nøye vurdere antall målepunkt som skal instrumenteres da innsamlet datamengde vil være proporsjonal med antall sensorer som skal installeres. Dersom konstruksjoner «overinstrumenteres» kan det øke mulighetene for at menneskelige og tekniske feil kan redusere påliteligheten til de innsamlede måleverdiene.
- Ved valg av sensorer som skal installeres, er det viktig å vurdere stabilitet som funksjon av eksponeringstid slik at vedlikeholdsprosedyrer, kalibreringsintervall og utskiftningskriterier kan etableres før anlegget settes i drift slik at dette kan ivaretas både økonomisk og teknisk av ansvarlig driftsenhet. Levetiden for hvert enkelt element av overvåkningssystemet må være tilpasset formålet. Instrumenteringen må ha et minimalt vedlikehold.

- Det er viktig allerede i prosjekteringsfasen å etablere rutiner og plassere ansvar for drift av overvåkningssystem og innsamling av måleverdier. Det kan gjøres ved å lage en driftsplan med enkle driftsrutiner. Planen må ivareta kvalitetsovervåkning av måleverdier og beskrive hvordan og når målingene skal gjøres. I driftsplanen må det inngå krav om utarbeidelse av driftslogg.
- I prosjekteringsfasen må det tas hensyn til på hvilken måte måleverdiene skal gjøres tilgjengelig for sluttbrukerne. Resultater må behandles og fremstilles for sluttbruker på en lettforståelig måte og uten at de forvrenges. Databehandlingen må samtidig være lite ressurskrevende og enkel å utføre.
- Det må i prosjekteringsfasen stilles krav til at det lages en egen dokumentasjon som viser det ferdige systemet. Dette skal distribueres og arkiveres slik at det er lett tilgjengelig både i forbindelse med drift/vedlikehold av systemet og ved avlesning/ vurdering av resultater fra instrumenteringen.
- Instrumentert overvåkning av tilstand må være kostnadsbesparende i forhold til det å utføre materialundersøkelser som gir tilsvarende resultater. Her må det samtidig huskes på at instrumentert overvåkning sannsynligvis vil føre til at det blir enklere å velge rett tiltak til rett tid, noe som er svært kostnadsbesparende og derfor kan forsvare en noe høyere kostnad for instrumentert overvåkning.
- Prosjekteringen må ivareta alle elementene som inngår i overvåkningssystemet (målesensor, instrument- og signalledninger, signalomformere, dataregistreringsenhet og dataoverføringssystem).
- I prosjekteringen må det foretas en vurdering av dagens lagringsmedium i forhold til den teknologiske utvikling, slik at endring og oppdatering av overvåkningssystemet blir mulig.
- Det må utarbeides nødvendige systemskisser, oversiktstegninger, detaljtegninger og beskrivelse som i minimum inneholder følgende:
  - generell oversiktstegning av sensorer, målebokser og datainnsamlingssystem
  - detaljerte tegninger av sensorer der det klart fremgår montering, tilkopling, ledningstype og ledningsføring frem til koblingsbokser
  - beskrivelse av omforming av analoge signaler (f.eks. fra analoge til digitale signal)
  - elektrisk koblingsskjema for sensorer, signalomformere, releer og signalbokser
  - elektrisk skjema for datainnsamlingssystemet som viser hvilke signaler som føres inn på de ulike data-inngangene og hvordan signalene konverteres og registreres i dataloggesystemet

- prosedyrer for innsamling og lagring av data skal for hvert målesignal inneholde opplysninger om eventuell behandling av sensorsignalet slik som forsterkning, aktiv stimulering, lavpass eller høypass filter (Hz), midling eller momentanverdier.
- i tillegg til målesignal fra de installerte sondene, skal det registreres et eller flere referansesignal. Referansekanalene skal demonstrere at overvåknings-systemet opererer tilfredsstillende. Det skal minst være et referansesignal for hver type målesignal (spenning, strøm, temperatur osv.) og minst en referanse på hvert målested når målestedene ligger fysisk adskilt og/eller består av mange (f.eks. mer enn 20) målesignaler.
- dato og klokkeslett for hver måleserie skal registreres i egne kanaler. Referanse til hvilken klokke som benyttes og kontroll av denne skal opplyses.

Det anbefales generelt at aksepterte forskrifter, retningslinjer og standarder legges til grunn for arbeidet (se ref. /4/, /5/ og /6/). Dette må spesifiseres i beskrivelsen.

## 3.4 Overordnede krav ved installasjon og drift

I dette kapittelet vil overordnede krav til installasjon, drift og løpende kvalitetskontroll av selve overvåkningssystemet bli beskrevet uten å gå inn på de ulike måleprinsipper og sensortyper. Dette blir beskrevet i de etterfølgende kapitler.

### 3.4.1 Installasjon

Installasjonen omfatter alle arbeider, materialer og utstyr for installering av et overvåkningssystem slik at signaler fra de fast installerte sensorene kan registreres, arkiveres og overføres.

Signalkabler og sensorer installeres så langt vekk som praktisk mulig fra eventuelle høyspenningskabler, og i alle fall ikke parallelt med slike. Avstander kortere enn 3 m bør unngås. Eventuelle krysninger av høyspenningskabler bør skje mest mulig vinkelrett. Signalkabler med ulikt signalnivå bør installeres minst 25 cm fra hverandre.

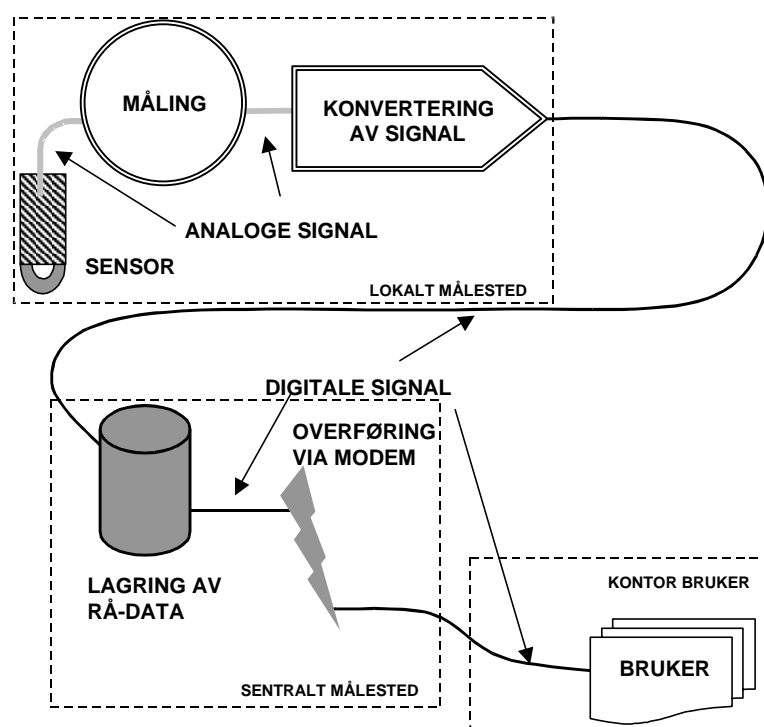
Jording av sensorer, signalomformere og signalledninger utføres iht. anerkjente normer og dokumenteres. Jordledning for 230 V installasjonen og armeringen i betongen bør kobles sammen /4/.

Ved dataoverføring bør fast telefonlinje eller datalinje benyttes. Dersom mobiltelefon eller lignende er påkrevet, skal plassering av denne ikke kunne influere på målesystemet.

Avstanden fra målepunkt/sensor til datalagringsenhet kan bli lang, dvs. mer enn 10 meter. Det anbefales derfor at måling/avlesing utføres så nær målepunktet/sensor som praktisk mulig. De avleste signalene bør så konverteres til digitale signal før de overføres til en sentral datalagringsenhet. Måledata kan eventuelt overføres via data-modem til bruker. Prinsippskisse for signalbehandling fra sensor til bruker er vist i figur 3.4-1.

Det skal utføres en kontroll av samtlige sensorer etter installasjonen. Sensorsignal registreres lokalt ved sensor og sammenlignes med signal registrert av overvåkningssystemet. I tillegg skal det kontrolleres om sensorsignal har overlagret vekselstrømskomponenter. På denne måten kontrolleres både sensorsignal og signaloverføring fra sensor til overvåkningssystem.

Kalibrering av sensorene skal demonstrere at de registrerte måleverdier er stabile og korrekte over en periode på minst en måned. Ved kalibrering av sensorene skal benyttede måleprosedyrer angis. Det skal også angis spesifikasjoner til benyttet utstyr med angivelse av målenøyaktighet, kalibreringsprosedyrer og kalibreringsstatus.



Figur 3.4-1: Prinsippskisse for signalbehandling fra sensor til bruker.

### 3.4.2 Drift

Drift av overvåkningssystemet må baseres på utarbeidet driftsplan som minst skal inneholde følgende:

- beskrivelse av lokalisering av sensorer med tilhørende sensorkode (f.eks. kanalnr.)
- generell oversiktstegning av sensorer, målebokser og datainnsamlingssystem
- elektrisk koblingsskjema for sensorer, signalomformere, releer og signalbokser
- beskrivelse av merking i koblingsbokser og av ledninger
- resultat fra ferdigkontroll etter installasjonen med angivelse av måleområde for hver sensor
- kontrollrutiner, med angivelse av nødvendige sjekkpunkter både for kontroll på stedet (i felt) og for kontroll fra kontor (via telefon e.l.)
- kalibreringsrutiner og kalibreringsprosedyrer
- rutiner for verifikasjon av måleresultater
- rutiner for tolkning av måleresultater
- sjekklister tilhørende punktene ovenfor
- driftslogg.

Et svært viktig punkt er utarbeidelse av en komplett driftslogg som løpende beskriver detaljert hva som skjer med instrumenteringen. Driftsloggen må fange opp alle plutselige hendelser som strømstans, sensorer som periodevis har vært ute av drift, vedlikeholdsarbeid på overvåkningssystemet osv.

Det må legges inn konstante referansekanaler. Da kan godheten av loggesystemet kontrolleres kontinuerlig og en får indikasjon på hvor eventuelle feil ligger. Referanser må velges med konstante verdier som ligger innenfor måleområdet.

Det er viktig at de utarbeidete driftsrutinene er enkle og entydige. Kontroll av overvåkningssystemet på stedet bør tas inn som en del av de rutinemessige inspeksjonene, dvs. integreres som en del av bruas FDV-system. Tilgjengelighet til loggesystemet for å hente ned data og kontrollere driftsstatus må være enkelt for brukeren.

Tolkning og bruk av resultater fra overvåkningssystemet vedrørende tilstandsutviklingen må også integreres i FDV-systemet. På denne måten sikres både at resultatene fra instrumenteringen blir nyttiggjort og at instrumenteringen ikke blir en frittstående aktivitet.



### **3.4.3 Presentasjon av måledata**

Alle data må presenteres på en enkel måte overfor sluttbrukerne (beslutningstakere). Målingene bør presenteres grafisk og fremskrives for hele installasjonens levetid. Måleresultatene må fange opp både langtidstrender og årstidsvariasjoner.

Datamengden må reduseres til bare å omfatte «riktige» data. Alle data skal lagres, men bare måledata som representerer sanne verdier og som kan benyttes videre, presenteres. Kanalene må bedømmes individuelt og eventuelle usikre måledata fjernes.

Rådata (spennings-, strøm- og temperatur-signal, dato og klokkeslett) fra korrosjons-sonder og annen instrumentering prosesseres ved bruk av ulike dataprogram. Prosesseringen utføres i følgende trinn:

#### **1) Omregning til ingeniørverdier**

- Ekskludering av feilmålinger, ustabile målinger og åpenbart gale data
- Omdanne og redusere data til korrosjonsparametre som for eksempel strømbehov, oksygentranport, potensial osv.
- Knytte hver parameter opp til plassering av målesonde og tid
- Etablere aksept- eller grenseverdier for å indikere enten «normale» forhold eller spesiell utvikling
- Utarbeide filer for lagring av måleverdier som formateres slik at de kan brukes direkte i databehandlingsverktøyet som anvendes av sluttbruker(e).

#### **2) Analyseteknikker**

- Dataglatting/midling over tid (for fjerning av støy og fremheving av sesong- og miljøvariasjoner)
- Glidende middelvei-beregninger
- Korrelasjons- og regresjonsanalyse
- Prognose over fremtidig utvikling.

#### **3) Mål for sluttbrukers analyse av måledata**

- Korrelasjon mellom registrerte måledata og inspeksjonsresultater.
- Varsel eller tidlig deteksjon om endringer i korrosjonsoppførsel som gir grunnlag for strakstiltak.
- Estimering av levetid eller overhengende skaderisiko (input til vedlikeholds- og inspeksjonsplanlegging).
- Verifikasjon av prosjekteringsgrunnlag.

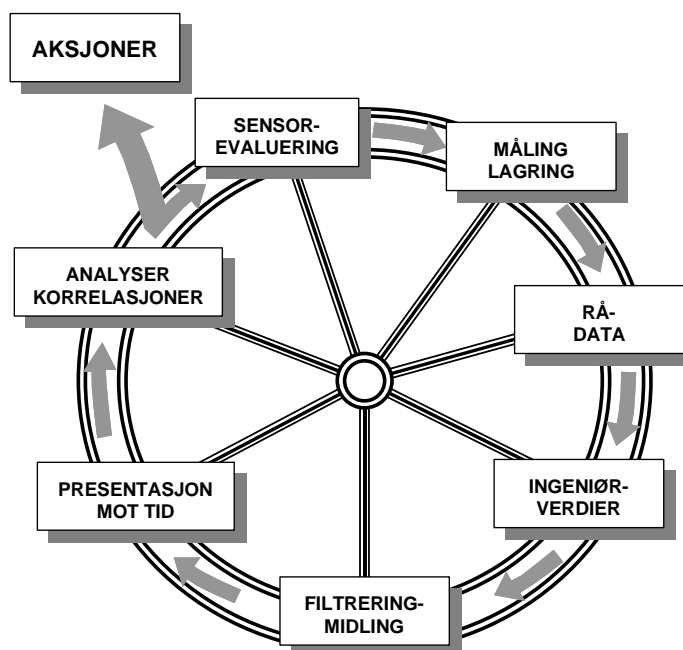
### 3.4.4 Verifikasjon, kontroll og kvalitetssikring

Status for samtlige sensorer med hensyn til koblingsfeil, kalibrering og at rett signal registreres på rett kanal må verifiseres regelmessig. Endringer i kalibreringer og utbedring av feil må kunne etterspores for hver enkelt sensor/kanal.

Måle-, overførings- og loggesystemet må verifiseres mht. virkelig målt og logget verdi. Det er ikke tilstrekkelig å kontrollere at data registreres i dataloggesystemet og overføres til en sentral enhet via modem. Det må regelmessig verifiseres at det er fornuftige og rimelig stabile signaler som registreres.

Når pålitelige data er presentert for brukerne, må forventet respons fra sensorer vurderes mot de registrerte verdiene slik at det avdekkes om sensorer og målinger fungerer etter hensikten og produserer meningsfylte, relevante og pålitelige data. Instrumenteringen må produsere data som er troverdige, dvs. at det må verifiseres med jevne mellomrom f.eks. med individuelle målinger og materialundersøkelser at resultatene er sannsynlige verdier. Resultater fra instrumentering må benyttes sammen med øvrige inspeksjonsdata ved tilstandsvurderinger i forbindelse med inspeksjoner.

Måleresultatene kan variere sterkt uten at dette kan åpenbart forklares. Dette kan være forårsaket av feil på sensorer, elektriske koblinger og mekanisk montering eller tilskrives miljøbelastninger på sensorer og målesystemet. Skal måleresultatene ha nytteverdi for sluttbruker, må det foretas en løpende kvalitetskontroll av hele målesystemet. Prinsipp for en kvalitetssikringsprosess av måledata er vist i figur 3.4-2.



Figur 3.4-2: Prinsipp for kvalitetssikring av måleresultater.

## 4 Måleprinsipper for korrosjonsovervåkning

### 4.1 Generelt om korrosjonsovervåkning

I dette kapittelet vil det bli gitt en generell beskrivelse av måleprinsippene som anvendes for å registrere relevante elektrokjemiske - og betongrelaterte parametre. I beskrivelsene er det også inkludert kort hvilke driftserfaringer man har hatt med de ulike metodene på Gimsøystraumen bru. For fullstendig beskrivelse av utført instrumentering på Gimsøystraumen bru og arbeid for å tolke måleresultater med hensyn på tilstandsutvikling, vises det til sluttrapport «Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon» /3/.

I beskrivelsene vil det skilles mellom elektrokjemiske målinger, andre målinger for å registrere korrosjonshastighet og betongrelaterte parametre.

### 4.2 Elektrokjemiske målinger

For de elektrokjemiske målingene, kan det skilles mellom målemetoder som krever «aktiv» påføring av signaler for måling av respons og metoder som «passivt» registrerer egenskaper til det innstøpte stålet, se tabell 4.2-1.

Tabell 4.2-1: Klassifisering av elektrokjemiske målemetoder.

Aktiv påførte signaler	Passiv respons
Lineærpolarisering, galvanostatisk puls	Potensialmåling
AC-impedans	Elektrokjemisk støy
Oksygentransportmåling	Elektriske motstandssonder

#### 4.2.1 Potensialmåling

Den mest utbredte målemetoden for å kartlegge korrosjonstilstanden til innstøpt stål er å registrere det elektrokjemiske potensialet til stålet vha. en referanseelektrode som plasseres i/på betongen i ulike posisjoner. Målinger utføres ved bruk av et voltmeter med høy indre motstand ( $\geq 10$  Mohm) hvor referanseelektroden er koplet til voltmeterets (+/-)-inngang og jording til armeringsnettet til voltmeteret sin (+)-inngang. Med manuelle målinger (plassering av referanseelektroden utenpå betongen) kan en registrere lokale potensialverdier samt potensialgradienter over store flater. Basert på vurdering av

potensialnivå og eventuelle gradienter kan man vurdere sannsynligheten for at det innstøpte stålet korroderer eller ikke.

Imidlertid er det flere faktorer som kan influere på potensialverdiene som registreres for innstøpt stål, og disse vil bli belyst i korthet. Vurderingen elektrokjemiske og ohmske av feilkilder nedenfor er knyttet til *innstøpte* referanseelektroder.

### **Elektrokjemiske effekter**

Betong er en svært kompleks elektrolytt som består både av faste stoffer og væske som er fordelt i et fint poresystem. Sammensetningen av væsken i disse porene er påvirket av ytre faktorer som kloridinntrengning og indre faktorer som karakteriseres av sement-kjemien.

Kretsen for potensialmåling består i prinsippet av to halvceller. Den ene er grenseflaten mellom armering og betong, den andre er mellom betong og referanseelektroden eller referanseelektrode med elektrolyttløsning. Disse halvcellene er fysisk adskilt av betong som fungerer som elektrolytt. Dersom sammensetningen av porevannet i betongelektrolytten er homogen, vil påvirkningen på potensialmålingen bli minimal. Normalt vil imidlertid betongoverdekningen variere med hensyn til hydroksylionkonsentrasjon (som følge av karbonatisering) eller kloridioner (som følge av kloridinntrengning), og disse konsentrasjonsvariasjonene vil kunne gi opphav til potensialforskjeller som kan påvirke måleverdiene.

Trolig vil disse effektene, som kalles grensesnitt («junction») eller diffusjonspotensialer forårsake en unøyaktighet på opp til noen titalls millivolt på potensialregistreringene. Ulike referanseelektroder vil også kunne være følsomme for endringer i oksygentilgang og pH-variasjoner i betongen (for eksempel karbonatisering). Dette er nærmere omtalt i dr.-avhandlingen til Roar Myrdal /7/ som ble gjennomført innenfor OFU-prosjektet.

### **Ohmske effekter**

En annen feilkilde for potensialmålinger i betong forårsakes av de ohmske eller motstandsmessige effekter av betongen som materiale. Når innstøpt stål korroderer, vil det være en strømtransport fra anodiske til katodiske områder på metallet gjennom betongen (elektrolytten).

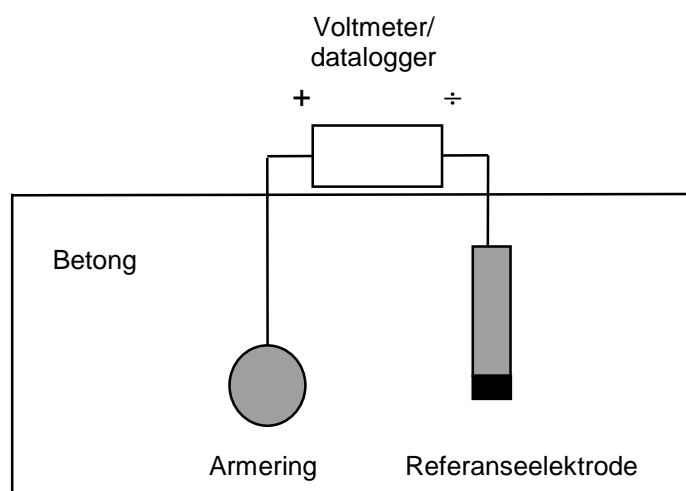
Dette vil gi en spenningsforskjell som ofte kalles IR-fallet, som i størrelse vil avhenge av strømstyrken og den elektriske motstanden til omgivende betong. Den elektriske motstanden vil kunne vise store variasjoner avhengig av fukt og kloridinnhold. Potensialet som registreres i betongen vil derfor være summen av metallpotensialet og IR-fallet.

I praksis betyr dette at over anodiske områder vil IR-fallet gi mer positive potensialverdier og over katodiske områder vil de bli mer negative. Dersom det i tillegg er makro-galvaniske effekter tilstede, vil effekten av IR-fall bli ytterligere komplisert. Når potensialverdier skal vurderes, må mulige effekter av IR-fall tas i betraktning.

Dette er nærmere omtalt i både /3/ og /7/.

### Generelt om potensialmålinger

I tillegg til å måle armeringens korrosjonspotensial, som gir informasjon om armeringens sannsynlige korrosjonstilstand, brukes innstøpte referanseelektroder i andre elektrokjemiske teknikker til å måle polarisasjonsmotstand og oksygentransport. Referanseelektroder benyttes også til kontroll av katodiske beskyttelsesanlegg. Referanseelektroder kan støpes inn i nye konstruksjoner eller installeres i eksisterende. I nye konstruksjoner kan referanseelektroder fastmonteres til armeringen før utstøping av konstruksjonsbetongen. I eksisterende konstruksjoner må det foretas opphugging eller boring av hull der referanseelektroden monteres i en sementmørtel.



Figur 4.2-1: Måling av armeringens korrosjonspotensial ved hjelp av innstøpt referanseelektrode.

Ved bruk av fastmonterte referanseelektroder for måling av det elektrokjemiske potensialet til innstøpt armering er det viktig å huske på at de registrerte potensialverdiene bare vil reflektere den elektrokjemiske tilstanden til armeringen lokalt, dvs. i området nær referanseelektroden, og ikke gi et bilde av tilstanden i konstruksjonen som helhet. Innstøpte referanseelektroder bør derfor plasseres i områder som funksjonelt er viktige for konstruksjonen og i områder hvor det er størst korrosjonsrisiko. Det anbefales å installere minst to referanseelektroder i samme lokalitet, eller nær hverandre, for å sikre mest mulig pålitelig langtidsovervåkning. Erfaringsmessig svikter enkelte referanse-

elektroder etter en tids bruk. Figur 4.2-1 viser en prinsippskisse av en innstøpt referanse-elektrode og hvordan armeringens korrosjonspotensial måles.

Dersom innstøpte referanseelektroder skal avdekke variasjon i potensialforholdene til innstøpt armering over tid (flere år) som følge av ulike miljøbelastning, må referanse-elektroder installeres i utvalgte deler av konstruksjonen. Som en referanse, bør det i tillegg installeres referanseelektroder i lite korrosjonsutsatte områder. Selv med et relativt stort antall innstøpte referanseelektroder vil imidlertid kun en liten del av konstruksjonen bli dekket. Til potensialkartlegging av hele konstruksjonen er kun overflatemålinger egnet. Slike målinger vil imidlertid ikke fange opp små gradvise potensialendringer over tid.

### **Erfaring fra Gimsøystraumen bru**

Potensialmålinger med innstøpte referanseelektroder har vært brukt i stort omfang på Gimsøystraumen bru. Erfaringene er mest omfattende fra bruk av ERE 10/ERE 20 referanseelektroder. De har gitt og gir etter 4 år pålitelige måleverdier  $\pm 3\%$ . Bruk av innstøpte referanseelektroder gir mer nøyaktige måleverdier enn EKP-målinger på betong-overflaten fordi måleforstyrrelser og andre feilkilder vil være mindre.

### **Anbefaling om bruk**

Potensialmålinger med innstøpte referanseelektroder anbefales som en sentral del i et automatisert tilstandsovervåkningssystem.

## **4.2.2 Elektrokjemisk støy**

Dette er en passiv metode i den forstand at den registrerer de spontane men små og tilfeldige variasjoner i for eksempel korrosjonspotensialet til et korroderende metall. Variasjonene i korrosjonspotensialet skyldes en kontinuerlig nedbryting/ oppbygging av den passive oksidfilmen på det innstøpte stålet.

Med svært stabil referanseelektrode og et voltmeter med svært høy oppløsning registreres spenningsvariasjoner over perioder på opp til to timer. Målingene analyseres ved hjelp av frekvensanalyse (FFT), som krever spisskompetanse. Korrosjonshastigheten hevdes å være proporsjonal med standardavviket til amplituden til det prosesserte signalet. Foreløpig bør elektrokjemisk støy betraktes som en metode under fortsatt utvikling i laboratoriet.

### **Erfaring fra Gimsøystraumen bru**

Forsøk på Gimsøystraumen bru etter at hovedprosjektet var avsluttet viste at elektrokjemisk støy fra korrosjonen fullstendig ble overdøvet av andre støykilder. Noen støysignaler kom med en regelmessighet som utelukker en elektrokjemisk opprinnelse. Problemet er at brua virker som en stor antenne. Nå må det opplyses om at det både går høyspentkabler og ordinær 220 V strømforsyning gjennom brua.

### **Anbefaling om bruk**

Ut fra en vurdering av metoden anbefales den ikke inkludert i et automatisert tilstands- overvåkningssystem.

## **4.2.3 Lineærpolarisering**

Lineærpolarisering består i å tilføre det innstøpte stålet eller en innstøpt sonde en ekstern likestrøm. Dette kan i praksis være en liten spennings- eller strømvariasjon. Når et spenningsignal påføres registreres den resulterende endringen i strøm. Når et definert strømsignal påføres registreres den resulterende endring i potensial.

Det er utviklet utstyr som kan anvendes i felt for å bestemme korrosjonshastigheten. Etter at korrosjonspotensialet er registrert, påtrykkes et typisk signal på 20 mV i anodisk og katodisk retning. Strømmen som initieres registreres og plottes som funksjon av spenningsendringen. Når en strømpuls påtrykkes, plottes den resulterende spenningsendringen som funksjon av strømsignalet. Helningen til den resulterende kurven  $[V \text{ (spenning)} / I \text{ (strøm)}]$  benevnes polarisasjonsmotstand, og denne er motsatt proporsjonal med korrosjonshastigheten.

Metodikken beskrevet ovenfor, eller sofistikerte tilpasninger, har tradisjonelt vært ansett som en laboratoriemetode, men har i de senere år blitt anvendt på betongkonstruksjoner. I betong er metoden beheftet med relativt store usikkerheter av flere årsaker. For det første har betong høy og varierende ledningsevne og er et inhomogent materiale. For det andre er det vanskelig å bestemme presist arealet til den del av armeringen som polariseres. Dette er prøvd løst ved å måle på avkappet armering eller ved måling med en skjermelektrode som får strømmen fra motelektoden til å gå vinkelrett inn på armeringen. Et problem med avkappet armering er at denne ikke korroderer likt med hovedarmering i nærheten. For det tredje er det en problemstilling at påtrykket strøm forbruker elektrisk ladning også til å forandre oksidfilmen og denne uønskede reaksjonen greier man ikke å ta hånd om. For det fjerde er det helt nødvendig å håndtere IR-fallet og dette er svært vanskelig. Spesielt er det vanskelig å finne instrumenter som håndterer lav korrosjonshastighet og høy kapasitans.

### **Erfaring fra Gimsøystraumen bru**

I Gimsøystraumenprosjektet har manuelle målinger med følgende metoder, som bruker relativt kortvarig polarisering av innstøpte sonder eller selve armeringsstålet, vært brukt:

- LPR (Lineærpolarisering)
- Galvanopuls (påtrykking av kjent strømpuls).

Erfaringene fra prosjektet er at LPR-målingene er relativt omstendelige å utføre. Resultatene er både usikre og tolkningskomplekse slik at bruksverdien av innsamlede måleverdier vurderes å være fraværende eller svært lav.

Erfaringen med galvanostatisk puls, dvs. påtrykking av strøm på et isolert stålstykke med begrenset flatinnhold skiller mellom problemfri og problematisk korrosjon. Bedre enn halvkvantitative mål på korrosjonshastigheten er ikke mulig med slike målinger alene.

### **Anbefaling om bruk**

Lineærpolarisering eller galvanopuls anbefales ikke inkludert i et automatisert tilstands-  
overvåkningssystem.

## **4.2.4 AC-impedans**

En forholdsvis ny teknikk for å kartlegge korrosjonsforholdene på innstøpt stål, består i å påføre stålet vekselstrømssignaler med ulike frekvenser og studere responsen som betong-stål grenseflaten gir. Vanligvis påføres signaler som varierer i frekvens fra 0,001 til 100 000 Hz. Impedansendringer og faseskift i den elektrokjemiske cellen kan da gi informasjon om armeringen er i passiv eller aktiv tilstand, med hvilken hastighet eventuell korrosjon foregår og om en eventuell korrosjonsprosess har spesielle hastighetsbestemmende trinn.

Teoretisk skulle denne metoden frembringe svært relevant informasjon for å belyse tilstanden til det innstøpte armeringsstålet. I praksis har det imidlertid vist seg svært vanskelig å få noe ut av metoden, da den krever kompleks instrumentering og spisskompetanse for å tolke resultater.

I løpet av de siste årene har det blitt utviklet bærbare instrumenter. Målinger ble utført på avkappet armering i Gimsøystraumen bru etter at hovedprosjektet var avsluttet. Det var ikke mulig å beregne korrosjonshastigheten kvantitativt fra disse resultatene med de teorier som er utviklet i dag. En annen mangel var at målingene trengte lang tid (helst en time eller mer). Det har vært antydning at metoden kunne brukes direkte på hovedarmeringen. Dette lot seg ikke gjøre på Gimsøystraumen bru.

### **Anbefaling om bruk**

Metoden anbefales ikke inkludert i et automatisert tilstandsovervåkningssystem.



### 4.2.5 Oksygentransportmåling (potensiostatisk polarisering)

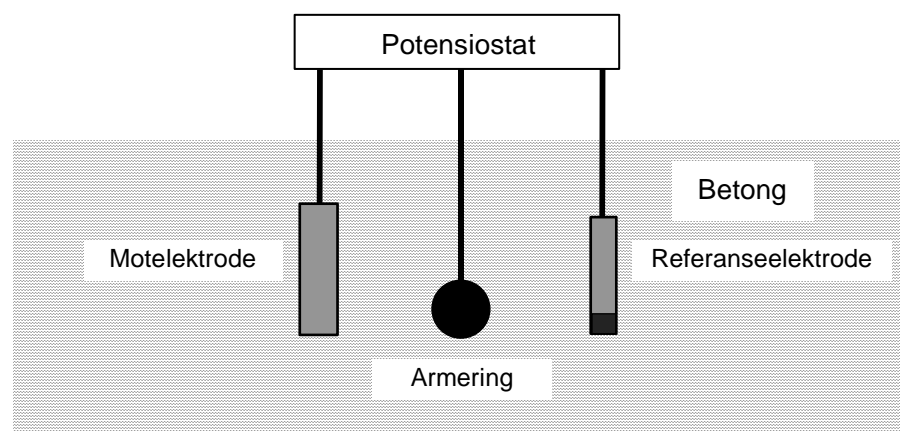
Oksygentransportmåling består i katodisk polarisering av en innstøpt sonde eller et isolert segment av armeringsnettet til en potensialverdi hvor en får informasjon om katodeaktiviteten til stålet. Denne type måling foregår over lang tid, og vil kunne gi informasjon om eksempelvis hastigheten av oksygentransporten til det innstøpte stålet. Det er viktig å få informasjon om katodekapasiteten til innstøpt stål fordi dette videre kan gi informasjon om korrosjonsfaren lokalt, fare for «makrocelle korrosjon» og i hvilken grad ulike miljøparametre påvirker korrosjonsprosessen.

#### Generelt om måling av oksygentransport

Formålet med denne typen måling er å få informasjon om transporthastigheten av oksygen til det innstøpte stålet. Oksygentransport vil normalt være svært avhengig av miljøforhold lokalt på konstruksjonen. Ved plassering av sonden for måling av oksygentransport er det således av vesentlig betydning å dekke områder med lo/le-effekter, områder som vekselvis er våte og tørre og områder som ventes å være mest korrosjonsutsatt.

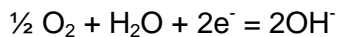
Måling av oksygentransport til det innstøpte stålet foregår ved at en innstøpt sonde eller et isolert segment av armeringsnettet polariseres potensiostatisk katodisk. På denne måten får man informasjon om katodeaktiviteten.

I figur 4.2-2 er prinsippet for måling av oksygentransporten til det innstøpte stålet skjematisk vist. Transportert mengde oksygen måles indirekte ved hjelp av størrelsen på katodisk strøm som er nødvendig for å opprettholde et definert statisk potensialnivå.



Figur 4.2-2: Prinsipp for måling av oksygentransporten til innstøpt armering.

Ved å potensiostatisk polarisere en innstøpt sonde eller et isolert segment av armeringsnettet katodisk, vil en kunne få informasjon om katodeaktiviteten på det innstøpte stålet. Da den dominerende katodereaksjonen er oksygenreduksjon, vil denne type måling foretatt over lang tid (måneder eller år) gi informasjon om oksygentransporten til det innstøpte stålet. Denne type informasjon er viktig fordi den kan belyse korrosjonsform av innstøpt stål lokalt, fare for makrocellkorrosjon og i hvilken grad ulike miljøparametre påvirker korrosjonsprosessen. Målingene er basert på at når det påtrykkes et negativt potensial (innen et visst potensialområde) på stål innstøpt i betong er den eneste katodereaksjonen reduksjon av oksygen på ståloverflaten:



Ved å påtrykke et konstant potensial innenfor dette potensialområdet på stålet kan oksygentransporten (eller rettere sagt hastigheten for oksygenreduksjon på ståloverflaten) måles som en elektrisk strøm. Ved å bruke Faradays lov kan massetransporten (fluksen) beregnes /10/:

$$J = I_{\text{grensestrøm}} / nF$$

J = fluks	(mol/m <sup>2</sup> s)
I = strømtetthet	(A/m <sup>2</sup> )
n = overføringstall (valens)	(4)
F = faradays konstant	(As).

Et for høyt potensial fører til at reaksjonen på overflaten går for langsomt og oksygentransporten undervurderes. Et for lavt potensial fører til uønskete reaksjoner som for eksempel spalting av vann. Anbefalt potensial er –900 mV målt mot ERE20 referanse-elektroder. Som det fremgår av figur 4.2-2, anbefales en galvanisert motelektrode. Reaksjonen på denne vil da være korrosjon av sink, mens en stålelektrode vil utvikle oksygen som kan diffundere til arbeidselektroden og forstyrre målingene.

### **Erfaring fra Gimsøystraumen bru**

Metoden har vært anvendt på bred basis på Gimsøystraumen bru gjennom måling av oksygentransport i ulike områder og miljøsoner.

Erfaringen med målemetoden fra prosjektet er god, da den effektivt synes å avspeile forskjeller i miljøbelastning samt effekter av forskjellige vedlikeholds- og reparasjonstiltak /3/.

### **Anbefaling om bruk**

Måling av oksygentransport anbefales inkludert i et automatisert tilstandsovervåknings-system.

## 4.2.6 Elektriske motstandssonder

En generell metode for å registrere mulig korrosjonsaktivitet i betongen er å støpe inn såkalte motstandssonder. Formålet med motstandssondene er å registrere korrosjons-initiering og korrosjonsutvikling på armeringsjern ved å måle økning i elektrisk motstand etter hvert som tverrsnittet av ikke-korrodert jern avtar.

Disse sondene kan ha mange ulike geometrier. En mulig sondeutforming er å benytte et ø8 mm neddreiet armeringsjern. Den ene halvparten av sonden beskyttes ved hjelp av et belegg slik at den ikke utsettes for korrosjonsangrep (på denne delen). Den andre halvparten av armeringsjernet er blottlagt og vil således eksponeres i et eventuelt korrosivt miljø.

Prinsipielt fungerer de ulike motstandssondene på samme måte. Korrosjonsangrep på den blottlagte delen vil kunne registreres ved en økning i den elektriske motstanden i armeringsjernet ettersom tverrsnittet reduseres ved korrosjon. Motstanden i korrosjonsproduktet (rust) er vesentlig høyere enn i det ikke-korroderte tverrsnittet.

For å kompensere for temperaturvariasjoner, sammenlignes den elektriske motstanden i den blottlagte delen med den elektriske motstanden i den belagte delen. Det legges til grunn en antakelse om at den relative endringen pga. temperaturvariasjoner fra måling til måling er lik for den beskyttede og blottlagte delen av sonden.

Disse målingene kan imidlertid ikke entydig skille mellom lokale groptæringer og generell korrosjon. Ved å vurdere endringshastigheten til den elektriske motstanden for den ubelagte delen av sonden bør imidlertid korrosjonangrepets karakteristikk kunne vurderes relativt godt. En rask motstandsøkning vil indikere et lokalt angrep, mens en relativ stabil utvikling av motstandsverdien vil indikere jamn tæring.

Motstandssonder installeres vanligvis i byggefasen og plasseres i overdekningen elektrisk isolert fra hovedarmeringen. Målinger fra motstandssonder må betraktes mer som et uttrykk for betongens korrosivitet lokalt enn som en virkelig avspeiling av korrosjonshastigheten. For å kartlegge korrosjonsforholdene på en større konstruksjon, kreves et relativt høyt antall sonder. Erfaring har vist at denne type sensor gir mest pålitelige målinger når de installeres i konstruksjonsfasen. Ved etterinstallasjon vil de kunne påvirkes av at de monteres i et annet materiale/miljø (pasta eller mørtel) enn armeringen som skal overvåkes.

### Erfaring fra Gimsøystraumen bru

Elektriske motstandssonder er ikke benyttet i instrumenteringen på Gimsøystraumen bru.

**Anbefaling om bruk**

Ut fra en vurdering av metoden kan elektriske motstandssonder anbefales brukt, men behovet må vurderes nøye. Der metoden er mest velegnet (i nye konstruksjoner), er oppfølgingsbehovet normalt lavest. En mulighet kan være å installere motstandssonder i byggefasen uten at sonden blir koblet opp til et automatisert tilstandsovervåkningssystem ved dag null.

## **4.3 Betongrelaterte parametre**

I dette kapittelet gis det en kort beskrivelse av måleteknikker for å registrere betongrelaterte parametre som vil påvirke korrosjonsforholdene for innstøpt stål.

### **4.3.1 Elektrisk motstand**

Korrosjon av stål innstøpt i betong innebærer en strømtransport gjennom betongen fra korroderende områder til ikke-korroderende områder. Derfor vil betongens elektriske motstand spille en viktig rolle for størrelsen på de strømmen som kan oppstå lokalt i en betongkonstruksjon. Den elektriske motstanden vil være påvirket av mange parametre som strukturell oppbygging av betongen lokalt (tilslag/pasta forholdet og armeringskonfigurasjon), betongens porøsitet og porestruktur, porestrukturens vannmetningsgrad (fuktinnhold), porevannets kjemi (løste ioner), kloridinnhold og temperatur. Den elektriske motstanden kan derfor variere lokalt mellom elektrodepar, såvel som over kort tid mellom et gitt elektrodepar pga. temperaturendring og over lengre tid pga. endringer i fuktinnhold og/eller løste ioner.

Det forhold at den elektriske motstanden lokalt vil være påvirket av betongens fuktinnhold innebærer at motstandsmålinger indirekte også vil reflektere vannmetningsgrad i betongen.

Ved feltinstallasjoner vil det normalt være umulig å måle spesifikk motstand pga. ubestemt geometri osv. Feltdata vil derfor primært være nyttige for å detektere endringer/forskjeller over tid og i ulike lokaliteter, samt til å registrere eventuelle effekter av overflatebehandling og andre reparasjons- og vedlikeholdstiltak.

## Generelt om måling av elektrisk motstand

Motstand måles vanligvis ved å registrere spenningsfallet som oppstår når en kjent strøm sendes mellom to elektroder. Spenningsfallet kan registreres mellom de strømførende elektrodene eller mellom strømløse punkter plassert i en fast avstand i strømfeltet. Vanligvis brukes en vekselstrøm for måling av motstand for å unngå polariseringseffekter på de strømførende elektrodene.

Elektriske motstandsmålinger vil kunne gi informasjon om hvordan betongens «korrosivitet» endrer seg over tid for eksempel som følge av kloridinnhold og vannmetningsgrad. Sonden for motstandsmåling bør derfor installeres i nærheten av andre sonder, som for eksempel referanseelektroder, for å underbygge vurderinger av korrosjonstilstand til innstøpt stål.

Elektrisk motstand i betong kan måles med ulike sondeutforminger og geometrier. På Gimsøystraumen bru har ulike sonder som fungerer som en voltamperemeter-bro vært utprøvd. En slik bro fungerer ved at det påtrykkes en kjent vekselspanning over to måleelektroder (f.eks. boltpar innstøpt i betong) og den resulterende strømmen registreres. Den totale impedansen kan således beregnes, men uten at det fremkommer om den er induktiv/kapasitiv eller rent ohmsk.

For å unngå polarisasjonseffekter i elektrolytten, benyttes vekselspanning med frekvens 100-1000 Hz til motstandsmålingene. Måleresultatene vil være avhengig av valgt frekvens pga. forholdet mellom induktive og kapasitive komponenter. En induktiv last gir lite eller ingen impedans (vekselstrøm-motstand) ved lave frekvenser mens den er tilsvarende stor ved høye frekvenser. For kapasitive laster er forholdet motsatt, lav frekvens gir stor impedans, mens høy frekvens gir lav.

Ulike metoder og sonder kan anvendes for måling av elektrisk motstand i betongen. På Gimsøystraumen bru er følgende metoder benyttet er:

- ledende belegg
- multiring
- boltpar
- fire bolter (Wenner prinsipp).

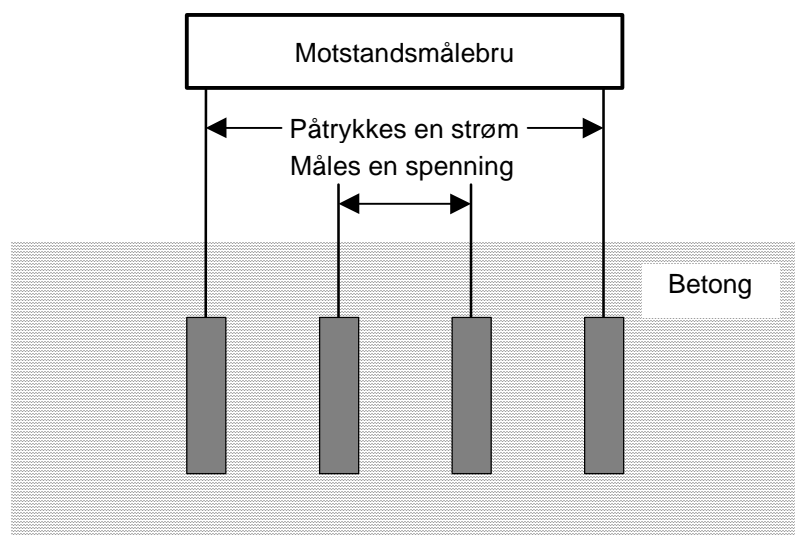
Måling av elektrisk motstand med ledende belegg gjøres med to parallelle striper av ledende belegg på betongoverflaten. Avstanden mellom dem er noen få cm. Motstanden mellom stripene måles direkte med vekselstrøm. Den målte motstanden vil først og fremst reflektere motstanden i betongens overflatesjikt i motsetning til de andre 3 sondetypene som måler 10-50 mm inn fra betongoverflaten.

Multiringelektrode er en sonde bestående av 9 stålringer som er «stabled» oppå hverandre med et tynt sjikt elektrisk isolerende material (plast) mellom hver ring. Sonden er plassert slik at ytterste ring flukter med betongoverflaten og de øvrige ringene befinner seg i økende dybde fra overflaten. Den elektriske motstanden måles direkte mellom hver ring med vekselstrøm og målingene skal gi en motstandsprofil i betongoverdekningen.

Motstandsmålinger mellom to bolter utføres ved å påføre en konstant vekselspenning mellom dem og registrere den resulterende strøm. Målemetoden kalles en voltampere-meter-bro eller VA-bro. Forholdet mellom spenning og strøm blir en impedans. Det fremkommer ikke om impedansen er induktiv, kapazitiv eller rent ohmsk. Den beregnede impedansen vil, hvis måleprøven inneholder kapasive eller induktive komponenter, være frekvensavhengig. Det bør benyttes separate måleledninger for påtrykt strøm og for målt spenning for å unngå målefeil.

Tas det hensyn til at betongen oppfører seg som en elektrolytisk celle, kan målekretsen uttrykkes med en motstand i parallell med en kapasitans. Benyttes en resistivitets-kapasitans-bro eller RK-bro til målingene, kan størrelsene på de kapasive og rent ohmske komponentene beregnes.

Wenner-målinger utføres ved at 4 bolter monteres i definert avstand langs en linje med like innbyrdes avstand, innstøpt i borehull (måleprinsippet kan også benyttes for målinger på betongoverflaten). En spenning påføres de to ytterste boltene, og den resulterende strømmen som da går mellom disse boltene registreres. Spenningsfallet over de midterste boltene registreres samtidig, og motstanden beregnes som forholdet mellom spenningsfallet over de midterste boltene og strømmen mellom de ytterste boltene. Et elektrodeoppsett etter Wenner-prinsippet er vist i figur 4.3-1.



Figur 4.3-1: Motstandsmåling med Wennerelektrode.

Fordelen med firebolt-systemet (Wenner) i forhold til systemet med boltpar er at overgangsmotstander og polariseringseffekter elimineres.

Med Wennerprinsippet er det en teoretisk sammenheng mellom målt motstand og betongens spesifikke motstand:

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot V/I$$

$a$  = avstanden mellom elektrodene

$V$  = spenningen

$I$  = strømmen.

Uttrykket gjelder for en ideell situasjon med et uendelig betongvolum og uten påvirkning fra nærliggende armering.

### **Erfaringer fra Gimsøystraumen bru**

Basert på prosjektets erfaringer er måling av elektrisk motstand med ledende belegg og multiring ikke anbefalt for langsiktige overvåkningsoppgaver. Imidlertid må det understrekes at data generert av multiring-elektrodene ikke har vært underlagt grundig analyse, slik at det først og fremst skyldes at denne sonden krever mange datakanaler for oppfølging som gjør at den ikke anbefales inkludert i et overvåkningssystem.

Måling av elektrisk motstand ved bruk to eller fire bolter (Wenner) innstøpt i borehull synes bedre å representere motstanden i et betongvolum, dvs. de er mindre følsomme for innstøpingsprosessen enn f. eks. multiringelektroden. Basert på erfaringene i prosjektet OFU Gimsøystraumen bru anbefales å bruke vekselspenning på 1000 Hz for måling av motstand i betong /3/ og /11/.

Motstandsmålingene utført med Wenner-prinsippet synes å avspeile effekten av de tidligere nevnte influerende parametre, og denne type målingen er spesielt å anbefale i et automatisert overvåkningssystem for en ny konstruksjon. Når bolter innstøpes i en eksisterende konstruksjon, innføres også vann via mørtelen, dvs. betongens fuktinnhold endres lokalt. Det tar lang tid (flere måneder) før betongen vender tilbake til naturlig fukttilstand.

### **Anbefaling om bruk**

Måling av elektrisk motstand i betongen anbefales inkludert i et automatisert tilstands-overvåkningssystem. På bakgrunn av erfaringene fra Gimsøystraumen bru anbefales bruk av Wenner-prinsippet for registrering av elektrisk motstand i betongen.

### 4.3.2 Fuktmålinger

Fuktilstanden og variasjoner relatert til tid og lokalisering kan ha stor betydning for ulike nedbrytningsprosesser i betongen. Ved utvikling av armeringskorrosjon er samtlige delprosesser fuktavhengige. Betydningen av fukt for ulike prosesser kan listes som følger:

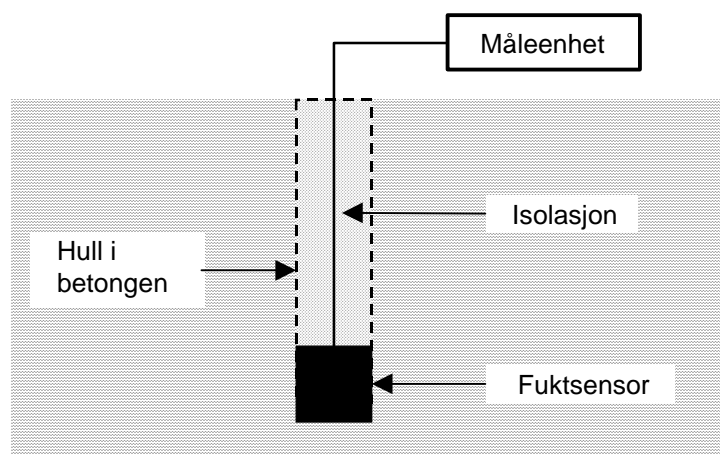
- karbonatisering er raskest ved ca. 50 % relativ fuktighet (RF)
- kloridinntrengning er maksimal under vekslings mellom uttørking og kapillærsug av saltvann
- oksygentransport er raskest i tørr betong
- vannmettet betong har lavest elektrisk motstand.

Bestemmelse av fuktilstand og variasjon i fuktilstand over tid er derfor viktig for å vurdere nedbrytningsmekanismer, for å utføre levetidsvurderinger og for å bestemme levetidsforlengende tiltak.

#### Generelt om måling av fukt i betong

Måling av den relative fuktigheten (RF) i et lite, lukket luftrom i likevekt med betongen lokalt gir informasjon om fuktvariasjoner og fuktnivå i betongen i ulike dybder og i ulike områder på konstruksjonen. Informasjon om RF kan avdekke både kortsiktige og langsiktige endringer i fuktnivå og dermed indirekte belyse tørre/våte effekter lo/le-effekter, effekten av overflatebehandlinger osv.

Måling av relativ fuktighet i kombinasjon med temperatur utføres i felt med kommersielt tilgjengelige målesonder. Disse måler samsvarende verdier for RF og temperatur i et forseglet hull boret inn i betongen. Prinsippskisse er vist i figur 4.3-2.



Figur 4.3-2: Prinsippskisse for måling av relativ fuktighet i betong.



RF gir ikke en fullstendig beskrivelse av betongens fukttilstand, fordi fuktinnholdet til en målt RF er avhengig av om tilstanden er nådd ved oppfukting (absorpsjon) eller uttørking (desorpsjon). I tillegg vil løste ioner (klorider osv.) endre RF for en gitt vannmetningsgrad. Det anbefales derfor at RF-overvåkning in situ kombineres med uttak av «urørte» prøver til laboratoriebestemmelse av fuktinnhold, vannmetningsgrad og RF. Dette er nærmere omtalt i /3/.

### **Erfaringer fra Gimsøystraumen bru**

Erfaringene fra Gimsøystraumen bru viser at langtidsstabiliteten til fuktsensorer er lite dokumentert. For å sikre pålitelighet til måleverdier for relativt fuktnivå i betongen er det påkrevd å utarbeide kalibreringsrutiner som følges opp regelmessig i drift (for eksempel hver 3. måned).

Erfaringene viser at sensorene må monteres slik at de lett kan fjernes for kalibrering i laboratoriet. Det anbefales kalibrering hver annen måned i startfasen, med lengre intervaller etter hvert som stabilitet dokumenteres.

Erfaringene fra Gimsøystraumen bru er at RF er meget stabil over tid i dybder større enn 15 mm fra betongoverflaten /3/. Sensorene kan ikke registrere korttidsvariasjonene i betongens yttersjikt. Deres potensielle nytteverdi ligger i å fange opp langtidsendringer i fukttilstanden nærmere armeringen, og i hvilken grad denne varierer mellom forskjellige konstruksjonsdeler.

### **Anbefaling om bruk**

Bruk av sonden for måling av relativ fuktighet krever spesiell kompetanse og hyppig oppfølging/kalibrering. Metoden anbefales derfor ikke generelt inkludert i et automatisert overvåkningssystem, men kun i spesielle tilfeller.

## **4.3.3 Temperaturmåling**

Alle kjemiske og fysikalske prosesser i betong er temperaturavhengige. En tommelfingerregel er at kjemiske reaksjonshastigheter dobles ved en temperaturøkning på 10 °C. Betongens elektriske ledningsevne er også sterkt temperaturavhengig. På grunn av betongens høye elektriske motstand vil evnen til å lede ioner ofte være bestemmende for hastigheten til korrosjonsprosessen. Bestemmelse av temperaturen og temperaturens variasjoner i betongen er derfor viktig ved tolkning av måleresultater som er fremkommet fra øvrig instrumentering.

### **Generelt om måling av temperatur i betong**

Det kan være hensiktsmessig å installere temperatursensorer i forskjellige dybder for å registrere temperaturprofiler i betongoverdekningen. Det er viktig at temperatursensoren plasseres tett opp til andre sensorer (avstand <50-100 mm) slik at mulige temperaturavhengige variasjoner avdekkes.

Temperatursensorer kan støpes inn i nye konstruksjoner eller installeres i eksisterende. I nye konstruksjoner kan temperatursensorer fastmonteres til armeringen før utstøping. I eksisterende konstruksjoner må det foretas opphugging eller boring av hull der sensoren kan fastmonteres i sementmørtel.

Temperaturmåling i betong kan utføres med motstandselement eller termoelement. Temperatursensorer av typen termoelement består av to enkeltledninger som gir opphav til en potensialforskjell når de er i elektrisk kontakt. Potensialforskjellen er proporsjonal med temperaturen.

### **Erfaringer fra Gimsøystraumen bru**

På Gimsøystraumen bru er det benyttet temperatursensorer av typen kobber-konstantan termoelement. Termoelementtrådene ble ved ulike installasjonstidspunkt hhv. tvunnet sammen eller loddet før innstøping. Det viste seg at flere av termoelementene med sammentvinnede tråder ble ustabile. Termoelementtrådene må loddet, og elementet kalibreres før innstøping. Forutsatt god kvalitetssikring i installasjonen er erfaringen fra Gimsøystraumen bru at termoelement gir pålitelige måleverdier over tid.

### **Anbefaling om bruk**

Måling av temperatur i betongen bør inkluderes i et automatisert tilstandsovervåknings-system.

## 5 Styre- og overvåkningsanlegg

### 5.1 Oppbygning av og oversikt over spesiell beskrivelse

I dette kapitlet er det gitt forslag til spesiell beskrivelse for styre og overvåkningsanlegg. Det vil være nødvendig å tilpasse denne for hvert enkelt prosjekt. Dette betyr at beskrivelsene i dette kapitlet ikke kan kopieres og legges direkte inn i nye beskrivelser. Det må altså foretas prosjektspesifikke endringer og suppleringer av den spesielle beskrivelsen for hvert enkelt instrumenteringsprosjekt.

For beskrivelse av styre- og overvåkningsanlegg på en eksisterende bru brukes prosess 87 Drift og vedlikehold av bruer. Beskrivelse av denne type anlegg ved nybygging gjøres i prosess 86 Utstyr, slitelag, tre og stein.

I tabell 5.1-1 er det gitt en oversikt over hvilke spesielle beskrivelser som er utarbeidet. Det er også angitt av prosess avhengig av om instrumenteringen foretas ved nybygging eller i en eksisterende konstruksjon.

*Tabell 5.1-1: Oversikt over utarbeidete spesielle beskrivelser.*

<b>Spesiell beskrivelse</b>	<b>Prosess ved nybygging</b>	<b>Prosess ved installasjon i eksisterende bru</b>
Anlegg for korrosjonsovervåkning	86.851	87.881
Referanseelektroder	86.8511	87.8811
Instrumentering for måling av oksygentransport	86.8512	87.8812
Elektriske motstandssonder	86.8513	87.8813
Instrumentering for måling av elektrisk motstand	86.8514	87.8814
Installasjon av RF-sensorer	86.8515	87.8815
Temperatursensorer	86.8516	87.8816
Referansesensorer	86.8517	87.8817
Jordingspunkter	86.8518	87.8818

## 5.2 Beskrivelse av system for korrosjonsovervåkning

### 5.2.1 Spesiell beskrivelse - Anlegg for korrosjonsovervåkning

- a) *Prosessen omfatter levering av alt nødvendig utstyr som for eksempel: måleskap, pc, datalogger, modem, koblingsbokser, kabelrør, ledninger osv. Videre omfattes nødvendig egenprosjektering, installasjon og funksjonskontroll etter installasjon av hele overvåkningsanlegget inkludert monterte sensorer (beskrevet i de etterfølgende prosesser).*

*I prosessen inngår også levering følgende dokumentasjon: materiell-liste, As-built tegninger, datablader for sensorer med angivelse av spesifikasjoner, kalibrerings-sertifikater for sensorer, utstyr og programvare for bearbeiding og presentasjon av data, samt driftsplan som inneholder:*

- beskrivelse av lokalisering av sensorer med tilhørende sensorkode (f.eks. kanalnr.)*
- generell oversiktstegning av sensorer, målebokser og datainnsamlingssystem*
- elektrisk koblingsskjema for sensorer, signalomformere, releer og signalbokser*
- beskrivelse av merking i koblingsbokser og av ledninger*
- resultat fra ferdigkontroll etter installasjonen med angivelse av måleområde for hver sensor*
- kontrollrutiner, med angivelse av nødvendige sjekkpunkter både for kontroll på stedet (i felt) og for kontroll fra kontor (via telefon eller lignende)*
- kalibreringsrutiner og kalibreringsprosedyrer*
- rutiner for verifikasjon av måleresultater*
- sjekklister tilhørende punktene ovenfor*
- driftslogg (mal for bruk i driftsfasen).*

- b) *Alle materialer, kabling og komponenter som skal brukes, inkludert utvendig beskyttelses- og festeanordninger, skal ha dokumentert tilfredsstillende bestandighet for det miljøet de blir eksponert for (f.eks. innstøpt i mørtel, utsatt for vær og vind, utsatt for saltvann). Alt utstyr skal minst fungere i temperaturområdet -20 °C til +50 °C. PVC-isolerte kabler og ledninger skal unngås.*

*Alle deler av overvåkningssystemet må være beskyttet vha. overspenningsvern mot skader forårsaket av lynnedslag.*

*Alle ledninger skal ligge beskyttet i kabelrør. Utvendig skal det benyttes sømløse stålrør.*

*Alle deler av systemet skal være beskyttet mot mekaniske skader og være fullstendig innebygd, og graden av tetthet i henhold til IEC 529 skal være:*

*inne i brukasse: IP 54*

*utvendig på søyler og brukasse: IP 68.*

- c) *All montasje skal gjøres etter gjeldende «Forskrifter for bygningsinstallasjoner» FEB 91 fra Produkt og Elektrisitetstilsynet og «Installasjonsregler» Publikasjon 1-94 fra Energiforsyningens Fellesorganisasjon (ENFO).*

*Alt arbeid skal være i overensstemmelse med NS 3421 Tekniske installasjoner.*

*Alle klemmelister, kabler og kontaktpunkt skal til enhver tid være entydig merket med referanse til sensor, sensortype og plassering (målefelt og målepunkt). Det skal utvikles og benyttes et system med fargekoder på de elektriske signalledningene som muliggjør identifikasjon av de enkelte lederes formål.*

*Entreprenøren må før montering starter kartlegge armeringsposisjon og måle overdekning i nødvendig omfang ved de respektive målepunkt. Dette utføres ved hjelp av et Covermeter. Overdekning målt med Covermeter skal kontrolleres ved opphugging i minimum ett punkt for hvert målefelt. Kontrollverdi og eventuelt avvik skal oppgis sammen med registreringer av armeringsposisjon og overdekning.*

*Sensorer skal plasseres slik at de ikke kommer i direkte kontakt med armering. Dette er viktig for å unngå kortslutning av systemet. Sensorer skal testes både før og etter montering. Svakheter eller feil skal utbedres.*

*All montering av sensorer skal utføres slik at de får beskrevet plassering i ferdig konstruksjon. Alle koplingspunkt for ledninger skal isoleres og gis vanntett beskyttelse med krympestrømpe med lim eller tilsvarende. Krympestrømpe alene tillates ikke benyttet.*

*Skjøter av kabler skal unngås i størst mulig grad og tillates ikke i innstøpte deler av kabelrør. Skjøter som likevel er nødvendige skal angis med plassering i slutt-dokumentasjonen.*

*Kabler skal ikke være bøyd med en radius mindre enn 10 ganger sin diameter. Alle kabler må sikres nødvendig strekkavlastning.*

*Fra hvert målepunkt skal ledninger samles i ett kabelrør. I installasjonsfasen skal kabler og ledninger skal være kveilet opp og sikret slik at de til enhver tid er beskyttet mot skader.*

*Signalkabler og sensorer installeres så langt vekk som praktisk mulig fra eventuelle høyspenningskabler, og i alle fall ikke parallelt med slike. Avstander kortere enn 3 meter skal unngås. Eventuelle kryssninger av høyspenningskabler skal skje mest mulig vinkelrett. Signalkabler med ulikt signalnivå skal installeres minst 25 cm fra hverandre.*

*Måling/avlesing skal utføres så nær målepunkt/sensor som praktisk mulig. De avleste signalene skal konverteres til digitale signal før de overføres til en sentral datalagringsenhet. Ved dataoverføring skal fast telefonlinje benyttes. Alle sensorer skal også kunne måles manuelt i måleskap og koblingsboks.*

*Jordledning for 230 V installasjonen og armeringsstålet kobles sammen i henhold til NVE-1991-FEB, paragraf 542.2.1. Ved måling og overføring av analoge måleverdier, skal signalene måles lokalt, digitaliseres og overføres til et sentralt datainnsamlingssystem.*

*Systemet skal beskyttes mot ukyndig bruk og hærverk.*

*Utførelsen skal være i henhold til arbeidsprosedyrer som er godkjent av byggherren. Leverandørens krav skal være innarbeidet i prosedyrene.*

- d) *Det skal utføres en kontroll av samtlige sensorer etter installasjonen. Sensor-signal skal registreres lokalt ved sensor og sammenlignes med signal registrert av overvåkningssystemet. I tillegg skal det kontrolleres om sensorsignal har overlagret vekselstrømskomponenter. Kalibrering av sensorene skal demonstrere at de registrerte måleverdier er stabile og korrekte over en periode på minst en måned.*

*Ved kalibrering av sensorene skal benyttede måleprosedyrer angis. Det skal også angis spesifikasjoner til benyttet utstyr med angivelse av målenøyaktighet, kalibreringsprosedyrer og kalibreringsstatus.*

*Installasjon av det totale målesystemet skal verifiseres mot eksisterende tegninger, beskrivelse og valgte standarder. Alle elektriske koblinger og montering må sjekkes. Det må utarbeides en komplett driftslogg som løpende beskriver i detalj alt som skjer med instrumenteringen under installasjon og igangkjøring. Driftsloggen skal utarbeides med tanke på at den skal brukes også i driftsfasen.*

### **5.2.2      Kommentarer til spesiell beskrivelse**

Det er en klar anbefaling at planprosessen ved instrumentering for automatisert overvåking ivaretar alle elementer fra målsetning med instrumenteringen til sluttbruk av måleverdier. Viktig i denne sammenheng er å kartlegge alle mulige lokale problemområder. Det betyr at det må utarbeides en spesiell beskrivelse for hvert enkelt instrumenteringsprosjekt.

Vurderinger som må gjøres, er for eksempel forhold knyttet til sensorutforming, installasjonsprosedyrer, dataoverføring, kabelføring, datalagring, datakonvertering og ikke minst eksterne støykilder og forstyrrelser.

I tillegg til problemområdene av teknisk art, bør det gjøres en vurdering av om installasjonen kan bli utsatt for andre påkjenninger. Andre mulige problemområder som bør tas til vurdering i prosjekteringsfasen er om installasjonen kan bli utsatt for hærverk og muligheten for skader pga. trafikk, kortslutning i elektriske kabler (for eksempel kabler til belysning på brua) og lynnedslag.

## 5.3 Referanseelektroder for potensialmålinger

### 5.3.1 Spesiell beskrivelse - Referanseelektroder for potensialmåling

- a) *Proessen omfatter levering av referanseelektroder, etablering av armeringskontakt, kabler, innstøpingsmørtel og annet nødvendig materiell samt installasjon med terminering av sensorkabler til koblingsboks. Inkludert i prosessen er også funksjonskontroll av sensor etter installering.*
- b) *Det skal benyttes referanseelektroder med minst 5 års dokumentert stabilitet i betong. Hver referanseelektrode skal leveres med kalibreringssertifikat der potensialet måles mot en kalomelelektrode med mettet kaliumklorid som indre elektrolytt (SCE).*

*Det skal benyttes en innstøpingsmørtel med minimalt svinn og som har god elektrisk ledningsevne. Forslag til mørtel skal godkjennes av byggherren.*

*Armeringskontakt skal bestå av selvgjengende skrue med kabelfeste.*

- c) *Før installering skal referanseelektrodene kalibreres i henhold til leverandørens kalibreringsprosedyre. Etter 1 døgn skal potensialet tilfredsstillende toleransekravet.*

*Elektroden monteres i et ø20 mm kjerneborhull 15-20 mm til side for armeringsstålet. Borehullet dybde skal være lik overdekning pluss diameteren til armeringsjernet. Den eksponerte flaten på elektroden skal plasseres slik at senter kommer i samme dybdenivå som ytterste armeringslag.*

*Overgangen mellom armeringskontakt og armering skal isoleres fra omliggende innstøpingsmørtel med tyntflytende epoksy for å unngå mulig galvanisk korrosjon i kontaktpunktet.*

*Eventuell skjøting av sensorkabelen må skje utenfor mørtelen.*

*Prosedyre for montering skal godkjennes av byggherren.*

- d) *Etter at referanseelektroden er fastmontert i herdnet mørtel skal den kontrollmåles mot armering. Potensialverdien registreres to ganger med minst én times mellomrom.*
- e) *Referanseelektrodens potensial ved kalibrering før installasjon skal ikke avvike mer enn  $\pm 10$  mV i forhold til leverandørens oppgitte potensial.*



### 5.3.2 Kommentar til spesiell beskrivelse

Kalibrering av referanseelektroder før installering er en viktig kvalitetskontroll som vil luke ut elektroder som ikke fungerer (defekt elektrode, brudd på ledning o.l.), eller har for stort avvik i forhold til toleransekravet. Egen kalibreringsverdi sammenlignes med leverandørens kalibreringssertifikat. Samme prosedyre må følges. Referanseelektroden plasseres i måleløsning (type løsning skal være gitt i kalibreringssertifikatet), og potensialet til elektroden registreres mot en god laboratorieelektrode. Vanligvis benyttes det mettet kalomel-elektrode. Ofte driver potensialet langsomt mot mer positive verdier. Derfor anbefales det at potensialverdiene registreres etter for eksempel 15 minutter, 1 time og 1 døgn. Etter 1 døgn bør potensialet tilfredsstillende toleransekravet. Vær oppmerksom på at kalibrering av referanseelektroder etter innstøping er beheftet med stor usikkerhet, og at slike målte potensialer ikke vil være direkte sammenlignbare med potensialverdiene i ovenfor beskrevne metode.

Det er ønskelig ikke å påvirke overdekningen nær armeringen som skal overvåkes. Om mulig bør derfor referanseelektroder monteres fra innsiden av konstruksjonen, eventuelt å foreta ledningsstrekke på innsiden for å påvirke betongoverflaten minst mulig. I tilfelle massive konstruksjoner må imidlertid all montering gjøres fra utsiden. I den spesielle beskrivelsen må det angis om referanseelektroder skal installeres fra innsiden eller utsiden av konstruksjonen.

### 5.3.3 Veiledning ved installering av referanseelektroder

Det bør benyttes et bor med diameter ca 5 mm større enn diameteren på referanseelektroden; vanligvis et ø20 mm bor. Elektroden monteres ca. 15-20 mm til side for armeringsstålet.

Det er mest gunstig å installere referanseelektroder i borehull fra innsiden av konstruksjonen. Størst presisjon og sikkerhet mot å skade betongen (sprekker, avskalling o.l.) oppnås ved bruk av kjernebor. Et annet alternativet er å bore et gjennomgående hull fra utsiden for å trekke ledninger inn i konstruksjonen. For massive konstruksjoner må hull bores fra utsiden til dybde lik overdekning pluss armeringsdiameter. Det anbefales at det benyttes trykkluft (eventuell sandblåsing) til rengjøring av hullene.

Før selve monteringen starter bør alle borehull vaskes ved vannspyling, og overskytende fritt vann blåses vekk og tørkes med trekkpapir. Borehullene fylles med mørtel vha. gyseutstyr f.eks. av type «Proff sprøyte». Til faststøping av elektrodene skal det benyttes en sementbasert mørtel. Det anbefales å bruke en mørtel bestående av sement, sand ( $\leq 5$  mm) og vann med vann/ement forhold tilnærmet lik betongens. Polymerer, silika eller andre tilsetninger som endrer ledningsevnen må ikke brukes. Mørtelen bør ha minst mulig svinn ( $< 1$  %).

Elektroden skyves sakte inn slik at overskytende mørtel presses ut. Eventuelle hulrom, særlig «skyggesiden», ved ledningsfeste etterfylles med mørtel. Til slutt avrettes mørtelen mot betongoverflaten. For å hindre rask uttørking av mørtelen bør alle fylte hull-åpninger (etter avretting) dekket med plasttape i minst ett døgn. Under størkning av mørtelen skal elektrodene stå urørt ca. 12 timer.

Det anbefales at armeringskontakt etableres minst 100 mm til side for referanse-elektroden på samme armeringsstang som skal overvåkes. Armeringen blottlegges ved boring eller meisling slik at det kan bores et 3 mm borehull i armeringen for innskruing av selvgjengende stålskrue. Ledning med klemhylse og øye festes til skruen som så skrues godt fast til armeringen. Kontakten forsegles med epoksy, og betongsåret/borehullet fylles med samme mørtel som ble benyttet ved installeringen av referanse-elektroden.

For nye konstruksjoner kan referanse-elektroden festes til eksisterende armering før utstøpning. Festeklips og ledninger må være alkaliebestandige. Under utstøpning må det sikres at ikke installasjonen blir ødelagt.

For eksisterende konstruksjoner må det foretas opphugging eller helst utboring for å plassere referanse-elektroden i passende avstand fra armering. Referanse-elektrodene må deretter faststøpes med sementbasert mørtel.

Etter at instrumenteringslokaliteten er bestemt, vil armeringsføring og -tetthet, betong-beskaffenhet (sprekker, steinreir o.l.) samt eventuelle krav om annen instrumentering legges føringer på den eksakte plasseringen av referanse-elektroden.

## 5.4 Måling av oksygentransport i betong

### 5.4.1 Spesiell beskrivelse - Instrumentering for måling av oksygentransport

- a) *Proessen omfatter levering av potensiostat, utstyr, materialer, kabler, innstøpingsmørtel og annet nødvendig materiell for kontinuerlig registrering av katodekapasiteten (oksygentransport) til innstøpt stål. Proessen omfatter også installasjon med terminering av sensorkabler til koblingsboks og funksjonskontroll etter installering.*
- b-c) *En isolert del av armeringen eller en ø8 mm bolt laget av stål i tilsvarende kvalitet som armering skal benyttes som arbeidselektrode i en potensiometrisk krets, mens en ø8 mm galvanisert stålbolt skal nyttes som motelektrode. Ved montasje i konstruksjonen skal den galvaniserte stålbolten plasseres i en avstand av minimum 25 mm fra arbeidselektroden. Kablene som benyttes for tilkobling til arbeidselektrode og motelektrode skal ha et ledertverrsnitt på minimum 0,75 mm<sup>2</sup>.*

*Potensiostaten må kunne levere min.  $\pm 200$  mA og ha en effekt på minimum 7,5 W.*

*Potensialet til arbeidselektroden skal påtrykkes vha. potensiostat som reguleres mot en stabil referanseelektrode. Ved montasje bør referanseelektroden monteres maksimum 25 mm fra arbeidselektroden og lokaliseres på motstående side i forhold til motelektroden.*

*Potensialet til arbeidselektroden skal settes lik -900 mV mot ERE 20 referanseelektrode eller tilsvarende potensialverdi mot andre referanseelektroder. Potensialet skal kontrolleres med et multimeter, der arbeidselektroden er koblet til «+ /high» inngang og referanseelektrode til «- /low» inngang, på multimeteret.*

*Bolten som benyttes som arbeidselektrode, skal instrumenteres med to kabler der den ene benyttes for tilkobling til strømlleverende instrument (potensiostat), og den andre benyttes til å kontrollere arbeidselektrodenes potensial. Motelektroden instrumenteres med én kabel som kobles til motelektrode («counter») – inngangen på potensiostaten.*

*For å registrere strøm som leveres til arbeidselektroden, monteres en 1-ohmig motstand i serie mot motelektroden. Motstanden skal være kalibrert.*

*Eksponert areal (bart stål) til arbeidselektrode skal oppgis i mm<sup>2</sup>.*

- d) *Når potensiostaten med tilhørende sensorer settes i drift, skal det kontrolleres at riktig potensialnivå med minusfortegn oppgis når en viser potensialet mellom*

*referanseelektrode (low/÷ inngang) multimeter og arbeidselektrode (high/+ inngang) på multimeteret.*

- e) *Drift i påtrykt potensial bør være mindre enn 100  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  og mindre enn 2 mV/1000 timer drift.*

### **5.4.2      Kommentarer til spesiell beskrivelse**

Motelektroden (anoden) kan være inert eller korroderende. Med inert elektrode vil det foregå en tilsvarende oksygenproduksjon på anoden som oksygenreduksjonen på katoden. På Gimsøystraumen bru ble det brukt korroderende anoder (galvaniserte bolter) der anodereaksjonen er produksjon av Zn-ioner.

## 5.5 Måling av korrosjonshastighet med elektriske motstandssonder

### 5.5.1 Spesiell beskrivelse - Elektriske motstandssonder

- a) *Prosessen omfatter leveranse og installasjon av motstandssonder med tilhørende sensorkabler terminert i måleskap.*
- b) *Motstandssonden består av et ø8 mm neddreiet armeringsjern. Halvparten av armeringsjernet er blottlagt og vil således eksponeres mot et eventuelt korrosivt miljø som utvikles. Den andre halvparten av sonden er korrosjonsbeskyttet ved hjelp av et belegg og vil således ikke utsettes for korrosjonsangrep.*

*Armering som brukes i sonden skal være av stål tilsvarende konstruksjonens armering.*

*Utforming av motstandssonden skal fremlegges byggherren til godkjenning før installasjon.*

- c) *Motstandssonden monteres i en trekantet kile i betongen som skjæres ut før montering. Sonden installeres slik at den får en overdekning på ca. halvparten av ytterste armeringslag. Sonden monteres i kilen etter at denne er rengjort. Kilen fylles med mørtel som sikres god heft mot gammel betong. Motstandssondene skal være isolert fra armeringen.*
- d) *Etter innstøping skal hver sonde funksjonskontrolleres og aktuell motstandsverdi skal registreres og loggføres.*

### 5.5.2 Kommentarer til spesiell beskrivelse

I eksisterende konstruksjoner hvor overdekninger er lav (for eksempel 30 mm), kan motstandssondene monteres direkte på armeringen, men med elektrisk isolerende mellomlegg i kontaktpunktene.

Beskrivelse for installering av elektrisk motstandssonde i en ny konstruksjon blir tilnærmet identisk som beskrivelsen for installasjon i eksisterende konstruksjon. Installasjonen blir enklere da innstøping kan foretas i konstruksjonsbetongen.

En viktig vurdering ved bruk ved nybygging vil være å plassere motstandssonden på riktig sted. Dersom målsetningen er kontinuerlig oppfølging av korrosjonsutsatte områder

på en kystbru, kan erfaringer fra Gimsøystraumen bru brukes for å lokalisere de mest kloridbelastede områdene, se ref. /12/ og /13/ .

En annen vurdering er hvilken overdekning sonden skal ha. For å benytte sonden for å få tidlig forvarsel må sonden plasseres i overdekningssonen. Monteres sonden med halvparten av armeringens overdekning, vil korrosjonsvarsel både komme tidlig og gi et godt bilde på hastigheten i skadeutviklingen.

## 5.6 Måling av elektrisk motstand i betong

### 5.6.1 Spesiell beskrivelse - Instrumentering for måling av elektrisk motstand

- a) *Proessen omfatter alle arbeider, materialer og aktuelt utstyr (bl.a. målebru) for å måle elektrisk motstand i betong, samt installasjon med terminering av sensor-kabler til koblingsboks. Inkludert i prosessen er også funksjonskontroll av sensor etter installering.*

- b) *Det skal benyttes Wenner sonder som består av 4 stk.  $\varnothing 8$  mm bolter med lengde 20 mm. Boltene skal være av karbonstål. I den ene enden av hver bolt festes en klemhylse med øye ved hjelp av en selvgjengende skrue tilpasset et  $\varnothing 3,5$  mm borehull i bolten.*

*Boltene maskeres med krympestrømpe (alternativt epoxy) fra og med enden med ledningskontakt (lengdeposisjon 0 mm) slik at den eksponerte delen vil være ca. 10 mm bolt (motstanden måles i dybde 10-20 mm).*

*Til faststøping av elektrodene skal det benyttes en sementbasert mørtel.*

- c) *Borehullene skal danne en rett linje slik at lysåpningen mellom hver bolt blir 50 mm. De fire boltene skal plasseres innefor en armeringsrute og lengst mulig vekk fra armeringen.*

*Boltene plasseres i  $\varnothing 12$  mm borehull med dybde 55 mm som er fylt med mørtel av passe konsistens. Boltene skyves sakte inn slik at overskytende mørtel presses ut, og eventuelle hulrom etterfylles med mørtel. Under størkning skal boltene stå urørt i minst 12 timer.*

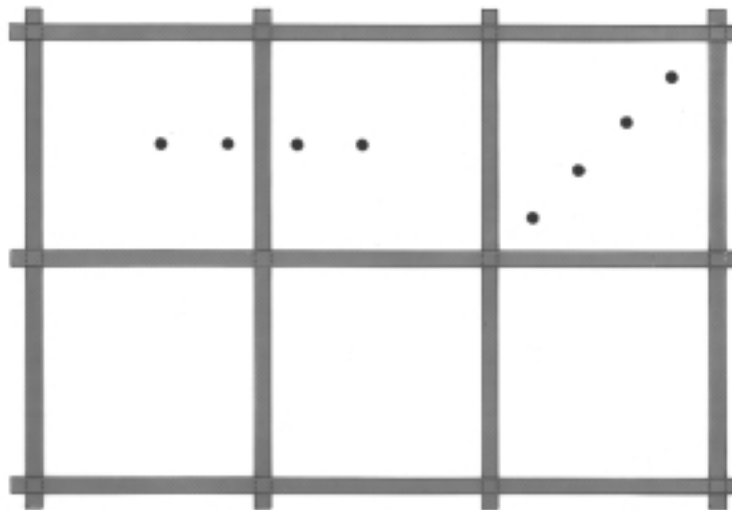
*Ved måling benyttes en vekselstrømkilde med 1000 Hz.*

- d) *Etter innstøping og 12 timer størkning skal hver sonde funksjonskontrolleres ved at spesifisert vekselstrøm sendes til sonder og resulterende spenning registreres. Aktuell motstandsverdi skal beregnes og loggføres. Nivået på motstanden som registreres skal vurderes av personell med kompetanse mht. rimeligheten i verdien. På dette viset kan mulige avvik i installasjonsprosessen og i sondekaraktistikken fanges opp.*

### 5.6.2 Kommentarer til spesiell beskrivelse

I spesiell beskrivelse er det beskrevet måling av motstand i dybde 10-20 mm ved å benytte 20 mm lange bolter og forsegle de ytterste 10 mm. Det er selvfølgelig mulig å spesifisere andre dybder for å måle motstand i betongen. På Gimsøystraumen bru er det målt motstand i flere ulike dybdeintervaller ved å bruke lengre bolter og forsegle ulike deler av boltene(e).

Det er beskrevet at sondene skal danne en rett linje slik at lysåpningen mellom hver bolt blir 50 mm, at de fire boltene skal plasseres innefor en armeringsrute og lengst mulig vekk fra armeringen. Avhengig av senteravstanden til armeringen, kan dette være motstridende krav. En alternativ plassering av boltene er å plassere to bolter på hver side av en armeringsstang. Mulig plassering av boltene er vist i figur 5.6-1.



Figur 5.6-1 Mulig plassering av bolter ved motstandsmåling etter Wenner-prinsippet.

I forhold til innstøpte bolter i fersk betong er det en markant effekt av å støpe inn bolter med mørtel i borehull i gammel betong:

- Det tar tid (flere måneder) innen fukten innført ved boring/innmørtling ikke forstyrrer målingene
- Spredningen i motstand mellom parallelle boltpar øker kraftig ved innmørtling, og det er enkeltteksempler på store avvikere.

Årsaken kjennes ikke, men det er nærliggende å tro at mørtelens svinn kan lede til delvis kontaktbrudd.



## 5.7 Installasjon av sensorer for måling av relativ fuktighet

### 5.7.1 Spesiell beskrivelse - Installasjon av RF-sensorer

- a) *Prosessen omfatter levering av fuktsensorer, kabler, innstøpingsmørtel og annet nødvendig materiell, samt installasjon med terminering av sensorkabler til koblingsboks. Inkludert i prosessen er også funksjonskontroll av sensor etter installering.*
- b) *Det skal benyttes fuktsensorer som måler relativ fuktighet i et avgrenset luftrom i betongen. Sensorene skal benytte et måleprinsipp som registrerer endring av konduktans. For måling med denne typen sensorer er det behov for en strømkilde som gir likestrøm i måleområdet 4-20 mA. Minste måleverdi settes ikke lik null slik at eventuelle strømbrudd eller instrumentfeil kan detekteres. Det kreves dokumentasjon på påliteligheten av sensorene ved ulike temperaturer. Dokumentasjonen skal godkjennes av byggherren.*
- c) *Sensoren skal monteres slik at RF kan måles i et lukket luftrom i dybde [angi dybde] i betongen.*

*Sensoren skal monteres slik at jevnlig kalibrering skal kunne foretas. Det vil si at sensoren skal kunne demonteres for kalibrering og monteres etter kalibrering med samme krav til etablering av et lukket hulrom.*

*Sensoren skal monteres på en slik måte at det ikke etableres «kuldebro» fra det lukkede hulrommet til ytermiljø eller til miljø inne i konstruksjonen (i tilfelle hule tverrsnitt).*

- d) *Etter installasjon skal sensoren kalibreres etter produsentens anvisninger. Slik kalibrering skal gjentas etter en måned, og sensoren skal da ikke ha drevet mer enn 1 % RF i forhold til kalibrert signal ved installasjon.*

### 5.7.2 Kommentarer til spesiell beskrivelse

Stabilitet over tid har generelt vist seg å være et stort problem med de fleste sensorer for måling av relativ fuktighet (RF). Dette er erfart både i laboratorium og i felt. Kalibrering jevnlig er derfor helt nødvendig for enhver feltinstallert sensor. Det betyr at sensoren lett må kunne demonteres for kalibrering over kjent RF-løsning i laboratoriet.

Den installerte sensoren skal måle den RF som porevannet utøver. Det ideelle ville derfor være å støpe inn en meget liten sensor i betongen. Dette er ikke praktisk mulig med dagens sensortyper. Det er videre viktig at sensoren sitt følehode er så nær betongen som mulig. Dette for å sikre at RF i det lukkede hulrommet styres av porevannet i betongen samt at temperaturforskjeller mellom betong og følehodet er minst mulig. En temperaturforskjell på bare 9 °C vil medføre en målefeil på 5 % RF.

### **5.7.3 Veiledning ved installasjon**

Montering av fuktsensor i hule konstruksjoner (for eksempel kassetverrsnitt) bør skje fra innsiden slik at yttersiden av betongoverflaten er uberørt.

En måte å gjøre dette på er først å kjernebore fra innsiden et ø100 mm hull med dybde ca. 150 mm mindre enn tykkelsen på tverrsnittet. I senter av dette hullet bores det videre et hull med ø25 mm mot yttervegg. Dybden på dette hullet tilpasses slik at sensoren plasseres med ønsket avstand til ytre overflate for målingene. Selve sensoren kan plasseres i et ø20 mm elektrorør med sagtagget ende som føres inn i det ø25 mm store senterhullet og forankres med O-ringer trædd utenpå elektrorøret.

Åpning i borehullet med ø100 mm lukkes med en tilpasset isoporbit som eventuell er dekket med en polyurethan masse. Ledninger fra sensorene føres gjennom hulltettinger. Hulltettinger må fjernes ved eventuell kalibrering av sonden.

## 5.8 Måling av temperatur i betongen

### 5.8.1 Spesiell beskrivelse - Temperatursensorer

- a) *Prosessen omfatter levering av temperatursensorer, innstøpingsmørtel og annet nødvendig materiell, samt installasjon og funksjonskontroll.*
- b) *Det skal benyttes temperatursensorer av typen kobber/konstantan termoelement-tråd med sveiset/loddet kontaktpunkt og alkaliebestandig krympestrømpe av gummi.*
- c) *Temperatursensorer skal kalibreres før installering. Sensoren skal fastmonteres med samme type mørtel som benyttes til montering av referanseelektroder. Eventuell kabelskjøting må skje utenfor innstøpingsmørtelen.*
- d) *Etter at temperatursensoren er fastmontert i herdnet mørtel kontrollmåles temperaturen med egnet avlesningsinstrument. Temperaturverdien registreres to ganger med minst én times mellomrom.*
- e) *Termoelementets toleranse skal være innenfor  $\pm 0,55^{\circ}\text{C}$ .*

### 5.8.2 Kommentar til spesiell beskrivelse

Alle temperatursensorer bør kalibreres/kontrolleres før installering. Kalibrering av termoelementer kan f.eks. utføres i isvann ( $0^{\circ}\text{C}$ ) ved at sensorens kontaktpunkt føres ned i vannet mens den motsatte enden forsynes med overgang til spesialinstrument for direkte avlesning av temperaturen. Et vanlig voltmeter har ikke tilstrekkelig oppløsning og vil ikke fungere tilfredsstillende fordi spenningsvariasjonen som funksjon av temperaturen er liten. I det aktuelle temperaturområdet er spenningsresponsen ca.  $0,04 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ . Termoelementet kan også kontrolleres i luft mot et vanlig termometer.

Dersom det er mulig, anbefales å installere temperatursensoren i borehull fra innsiden av konstruksjonen (i tilfelle hule tverrsnitt).

### 5.8.3 Veiledning ved installering av temperatursensorer

Den enkleste løsningen er å plassere temperatursensorer i samme borehull som benyttes til referanseelektroder eller andre sensorer. En slik løsning setter imidlertid store krav til innmørtlingen. Ved montering av mange sensorer i samme borehull kan det være vanskelig å få mørtelen til å omslutte sensorene helt. Dessuten kan det dannes

«kuldebruer» slik at den registrerte temperaturen ikke blir representativ for betongen i det aktuelle dybdenivået. Eksempelvis vil en stålbolt (sensor for motstandsmåling) lede varme mye bedre enn betongen. En temperatursensor i berøring med en slik bolt vil kunne gi misvisende måldata. Egne hull til temperatursensorer er sikrest.

For å måle temperaturprofiler (f.eks. to dybdenivåer: 20 mm og 40 mm), anbefales det å plassere sondene i separate borehull (med minst mulig diameter, 8-12 mm) ved siden av hverandre. Helst bør det bores slik at måleledningene kan trekkes direkte inn i konstruksjonen uten å føres via ytre betongoverflate. Dersom det ikke er mulig, må det bores hull fra utsiden til ønsket dybde. Avstanden mellom borehull og nærmeste armeringsstang bør ikke være mindre enn tykkelsen på overdekningen. Selve monteringen av sensoren utføres som for referanseelektroder.

Utførelsen skal generelt være i henhold til arbeidsprosedyre som er godkjent av byggherren. Leverandørens krav skal være innarbeidet i prosedyren.

## 5.9 Referansesensorer og jordingspunkter

### 5.9.1 Spesiell beskrivelse - Referansesensorer

- a) *Prosessen omfatter leveranse og installasjon av referansesensorer med tilhørende sensorkabler terminert i måleskapet for målefeltet. Inkludert i prosessen er også funksjonskontroll av sensor etter installering.*
- b) *Referansesensorene skal bestå av én motstand ( $\pm 2\%$ ) varierende fra ca. 100 til 10000 ohm. Det skal velges forskjellige motstands verdier for de ulike fysiske plasseringene på brua for å kunne sikre sporbarhet av målt verdier.*
- c) *Referansesensorene skal støpes inn i konstruksjonen med tilhørende sensor-kabel ved ett av målepunktene i hvert målefelt og skal avsluttes i måleskapet for målefeltet.*

### 5.9.2 Spesiell beskrivelse - Jordingspunkter

- a) *Prosessen omfatter leveranse og installasjon av kabler og jordingsklemmer til jordingspunktene. Formålet med jordingspunktene er å ha en sikker referanse for målesensorene nevnt over.*

*Det skal installeres ett jordingspunkt ved hvert målepunkt.*

- b) *Jordingsklemmene skal være av stål tilsvarende konstruksjonens armering. Det skal benyttes jordkabler med tverrsnitt  $10\text{ mm}^2$  Cu.*
- c) *Jordkablene skal termineres i de respektive måleskapene som er plassert innvendig i brukassen. Jordledningene skal ikke kobles sammen, men føres separat frem til måleskapet.*

## 6 Oppsummering og anbefalinger

### 6.1 Planlegging og prosjektering

Ved planlegging og prosjektering av et automatisert tilstandsovervåkningsanlegg er det avgjørende å fokusere på følgende momenter:

- Sluttbruker bør ha en sentral plass i planleggingen.
- Det er viktig å foreta en grundig vurdering for å definere omfang og plassering av permanent installerte sensorer.
- Det er viktig å nøye vurdere antall målepunkt som skal instrumenteres for å unngå «overinstrumentering» (drukne i data).
- Prosjekteringen må ivareta samtlige elementer som inngår i overvåkningssystemet fra målesensor, via signalledninger og dataregistreringsenhet til dataoverførings-system.
- I prosjekteringen må det spesifiseres at alle materialer, kabling og komponenter som skal benyttes tilfredsstillende bestandighet for det miljøet de blir eksponert.
- Utarbeidelse av driftsplan bør være en del av prosjekteringen.
- I prosjekteringsfasen må det tas hensyn til på hvilken måte måleverdiene skal gjøres tilgjengelig for sluttbrukerne.
- Det må i prosjekteringsfasen stilles krav til at det utarbeides As-built dokumentasjon.

### 6.2 Sensortyper

Ved valg av sensorer som skal installeres, er det viktig å vurdere stabilitet som funksjon av eksponeringstid slik at vedlikeholdsprosedyrer, kalibreringsintervall og utskiftningskriterier kan etableres før anlegget settes i drift. Levetiden for hvert enkelt element av overvåkningssystemet må være tilpasset formålet.

Sensorer skal leveres med kalibreringssertifikater og datablader med angivelse av spesifikasjoner, nøyaktighet og kalibreringsintervaller.

Nedenfor er anbefalinger om bruk av ulike sensortyper oppsummert. Dette er gjort med bakgrunn i erfaringene på Gimsøystraumen bru.

### **Potensialmålinger med innstøpte referanseelektroder**

Potensialmålinger med innstøpte referanseelektroder har vært brukt i stort omfang på Gimsøystraumen bru. Erfaringene er mest omfattende med ERE 10/ERE 20 referanseelektroder, og disse har gitt og gir pålitelige måleverdier i eksponeringsperioden hittil. Innstøping av referanseelektroder anbefales som en sentral del i et automatisert tilstandsovervåkningssystem. Det anbefales at det installeres 2 referanseelektroder i hvert målepunkt som skal følges opp.

### **Elektrokjemisk støy**

Det har kun vært utført manuelle målinger på Gimsøystraumen bru (etter at hovedprosjektet var avsluttet). Metoden anbefales ikke inkludert i et automatisert tilstandsovervåkningssystem.

### **Lineærpolarisering**

Erfaringene fra prosjektet (manuelle målinger) er at målingene er relativt omstendelige å utføre, resultatene er både usikre og vanskelige å tolke slik at bruksverdien av innsamlede måleverdier vurderes å være fraværende eller svært lav. Lineærpolarisering anbefales ikke inkludert i et automatisert tilstandsovervåkningssystem.

### **AC-impedans**

Metoden er prøvd på Gimsøystraumen bru etter at hovedprosjektet var avsluttet. Metoden anbefales ikke inkludert i et automatisert tilstandsovervåkningssystem.

### **Oksygentransportmåling (potensiostatisk polarisering)**

Metoden har vært anvendt på bred basis på Gimsøystraumen bru gjennom måling av oksygentransport i ulike områder og miljøsoner. Erfaringen med målemetoden fra prosjektet er god, da den effektivt synes å avspeile forskjeller i miljøbelastning samt effekter av forskjellige vedlikeholds- og reparasjonstiltak. Måling av oksygentransport anbefales inkludert i et automatisert tilstandsovervåkningssystem.

### **Måling av korrosjonshastighet med elektriske motstandssonder**

Elektriske motstandssonder er ikke benyttet i instrumenteringen på Gimsøystraumen bru. Ut fra en vurdering av metoden, kan elektriske motstandssonder anbefales brukt,

men behovet må vurderes nøye. Der metoden er mest velegnet (i nye konstruksjoner), er også oppfølgingsbehovet normalt lavest. En mulighet kan være å installere motstands-sonder i byggefasen uten at sonden blir koblet opp til et automatisert tilstandsovervåkingssystem ved dag null.

### **Elektrisk motstand**

Måling av elektrisk motstand i betongen anbefales inkludert i et automatisert tilstands-overvåkningssystem. På bakgrunn av erfaringene fra Gimsøystraumen bru anbefales bruk av Wenner-prinsippet for registrering av elektrisk motstand i betongen. I gjennomføring av målingene anbefales å bruke vekselspanning på 1000 Hz.

### **Fuktmålinger**

Erfaringene fra Gimsøystraumen bru viser også at RF er meget stabil over tid i dybder større enn 15 mm fra overflaten. Sensorene kan altså ikke registrere korttidsvariasjonene i betongens yttersjikt. Deres potensielle nytteverdi ligger derfor i å fange opp langtidsendringer i fukttilstanden nærmere armeringen, og i hvilken grad denne varierer mellom forskjellige konstruksjonsdeler. Bruk av sonden for måling av relativ fuktighet krever spesiell kompetanse og hyppig oppfølging/kalibrering og metoden anbefales derfor ikke generelt inkludert i et automatisert overvåkningssystem, men bare ved spesielle målebehov.

### **Temperaturmåling**

Måling av temperatur i betongen bør inkluderes i et automatisert tilstandsovervåkningssystem. På Gimsøystraumen bru er det benyttet temperatursensorer av typen kobber-konstantan termoelement. Erfaringen tilsier at termoelementtrådene må loddes og elementet kalibreres før innstøping. Temperatursensorene bør installeres i egne borehull og ikke i samme borehull som andre sensorer.

### **Referansesensorer**

Det anbefales å legge inn konstante referansekanaler. Hensikten med referansesensorene er å kontrollere påliteligheten av loggesystemet kontinuerlig, og få en indikasjon på hvor eventuelle feil ligger. Referanser må velges med konstante verdier som ligger innenfor måleområdet.

### **Innstøpningsmørtler**

Generelt kan det sies at innstøping av sensorer er et kritisk punkt. Det er helt avgjørende for funksjonen til flere av sensorene at det er god kontakt i fasene betongen/innstøpnings-



mørtel/sensor. Det anbefales å bruke en innstøpingsmørtel som har minimalt svinn og god ledningsevne.

#### **Bolttyper osv.**

For veiledning om valg av bolttyper og annet utstyr eller materiell, vises det til spesiell beskrivelse for de ulike sensortypene.

## **6.3 Automatisk overvåkningssystem**

Det anbefales å benytte et overvåkningssystem som benytter lokale måleenheter. Dvs. at analoge signaler blir avlest så nær sensorene som mulig og at signalet blir omformet til et digitalt signal for overføring til lagringsenhet eller PC. Ved at måleresultatet overføres digitalt til PCen blir det dermed ikke påvirket av støy fra lange måleledninger. Alle data som samles inn blir permanent lagret i datalageret og kan overføres til brukerens PC ved hjelp av et modem.

## **6.4 Installasjon og driftsfase**

For installasjon og driftsfase er følgende 3 faktorer avgjørende:

- kontroll av samtlige sensorer etter installasjon
- drift i henhold til en på forhånd utarbeidet driftsplan
- planmessig verifikasjon av måledata.

Kontroll av samtlige sensorer bør utføres etter installasjonen. Sensorsignal registreres lokalt ved sensor og sammenlignes med signal registrert av overvåkningssystemet. I tillegg skal det kontrolleres om sensorsignal har overlappet vekselstrømskomponenter. Kalibrering av sensorene skal demonstrere at de registrerte måleverdier er stabile og korrekte over en periode på minst en måned.

Drift av overvåkningssystemet må baseres på utarbeidet driftsplan som skal ivareta følgende: Oversikt og lokalisering av sensorer, kontrollrutiner med angivelse av nødvendige sjekkpunkter for kontroller med tilhørende sjekklister, kalibreringsrutiner og kalibreringsprosedyrer og driftslogg.

Måle-, overførings- og loggesystemet må verifiseres mhp virkelig målt verdi og logget verdi. Det er ikke tilstrekkelig å kontrollere at data registreres i dataloggesystemet og

overføres til en sentral enhet via modem. Det må regelmessig verifiseres at det er fornuftige og rimelig stabile signaler som registreres.

## 6.5 Bruk av måledata

Alle data må presenteres på en enkel måte overfor sluttbrukerne (beslutningstakere). Målingene bør presenteres grafisk og fremskrives for hele installasjonens levetid. Måleresultatene må fange opp både langtidstrender og årstidsvariasjoner.

Hensikten med innhenting av måledata er at sluttbruker skal benytte resultatene i sitt arbeid. Ved å sammenfatte informasjon fra inspeksjoner og registrerte måledata vil resultatene kunne benyttes på flere måter. Mulige bruksområder er: varsel eller tidlig deteksjon om endringer i korrosjonsoppførsel som gir grunnlag for strakstiltak, estimering av levetid (input til vedlikeholds- og inspeksjonsplanlegging) eller verifikasjon av prosjekteringsforutsetninger.

## 7 Referanser

- /1/ Statens vegvesen: *Forvaltning, drift og vedlikehold av bruer*. Håndbok 147. Oslo 1997.
- /2/ Statens vegvesen: *Inspeksjonshåndbok for bruer*. Håndbok 136. Høringsutgave. Oslo 1998.
- /3/ OFU Gimsøystraumen bru: *Sluttrapport: Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon* (Final report «Instrumentation, documentation and verification»). Publikasjon nr. 86. Veglaboratoriet 1998.
- /4/ Norges vassdrags- og energidirektorat: *Forskrifter for elektriske anlegg; Maritime installasjoner, FEA-M*. Oslo 1990.
- /5/ Produkt- og Elektrisitetstilsynet: *Retningslinjer for jording i maritime anlegg*. Oslo 1993.
- /6/ NBR: *Beskrivelsestekster for installasjoner: Tekniske bestemmelser – Spesifiserende tekster*. NS 3421. NSF 1984.
- /7/ R. Myrdal: *Evaluation of Electrochemical Techniques for Assessing Corrosion of Steel in Concrete*. Dr.grad. UiO 1998.
- /8/ Statens vegvesen: *Prosesskode-2, Standard arbeidsbeskrivelse for bruer og kaier*. Håndbok 026. Oslo 1997.
- /9/ Aa. Blankvoll, K. Grefstad, F. Fluge, I. Markey og B. Espelid.: *Instrumentert korrosjonsovervåkning - ett skritt videre*. Bestandighetsprosjektet, Rapport DP4. Foreløpig utgave 1998. Norges byggforskningsinstitutt.
- /10/ *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*. In: Annual book of ASTM standards, vol. 03.02: ASTM G 3-89. ASTM, Philadelphia PA.
- /11/ E. J. Sellevold og G. I. Sletten: *OFU Gimsøystraumen bru – elektrisk motstand i betongen*. Rapport nr. P-96-038. OFU Gimsøystraumen bru 10/96.

- /12/ OFU Gimsøystraumen bru: *Klimapåkjennning og tilstandsvurdering*. Sluttrapport S-96-040. OFU Gimsøystraumen bru. 11/97. Også utgitt som Publikasjon nr. 85. Veglaboratoriet 1997.
- /13/ OFU Gimsøystraumen bru: *Anbefalinger for inspeksjon, reparasjon og overflatebehandling av kystbruer i betong*. Publikasjon nr. 87. Veglaboratoriet 1998.
- /14/ *International Conference Repair of Concrete Structures - From Theory to Practice in a Marine Environment, Svolvær, Norway 28-30 May 1997; Proceedings*. Norwegian Road Research Laboratory 1997.
- /15/ *International Conference Repair of Concrete Structures - From Theory to Practice in a Marine Environment, Svolvær, Norway 28-30 May 1997; Proceedings; Additional Papers*. Norwegian Road Research Laboratory 1997.